



Emma Lottanen

Maanalaisten tilojen rakentamisen vaikutus Tikkurilan keskusta-alueen pohjaveden virtaukseen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.05.2013

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Heikki Kangas

Tekijä Emma Lottanen

Työn nimi Maanalaisten tilojen rakentamisen vaikutus Tikkurilan keskusta-alueen pohjaveden virtaukseen

Laitos Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

Professori Pohjarakennus ja maamekaniikka

Professuurikoodi Rak-50

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Heikki Kangas

Päivämäärä 27.05.2013

Sivumäärä 78 + 12

Kieli suomi

Tikkurilan keskusta on rakenteilla kolme uutta rakennusta, joiden rakenteet ulottuvat nykyisen pohjavedenpinnan alapuolelle. Riskinä on, että kohteet alentavat pohjaveden pintaa pysyvästi. Pohjaveden aleneminen alkuperäisestä tasosta kiihdyttää maanvaraisien rakennusten ja rakenteiden painumista sekä puupaaluperustusten lahoamista. Tikkurilan keskusta-alue Vantaalla sijoittuu pääosin pehmeikköalueelle. Tikkurilan keskustassa ei saa pysyvästi alentaa pohjaveden pintaa, mikä on huomioitava kohteiden suunnittelussa.

Tässä diplomityössä tarkasteltiin uusien maanalaisten tilojen pitkäaikaisia vaikutuksia Tikkurilan keskusta-alueen pohjaveden virtaukseen. Lisäksi tarkasteltiin, parantaako rakennusten ympärille rakennettava sepelitäyttö pohjaveden virtausta rakennusten ympäri. Kohteesta laadittiin kolmiulotteinen pohjavesimalli elementtimenetelmään perustuvalla SoilVision SVFlux -ohjelmalla. Tutkimusta varten koottiin tietoa myös Tikkurilassa jo ennestään olevista, pohjaveteen mahdollisesti vaikuttavista maanalaisista tiloista.

Työssä muodostetun pohjavesimallin perusteella uudet maanalaiset tilat alentavat pohjaveden pintaa pysyvästi 0,3 m virtauksen alajuoksun puolella, jos pohjaveden virtausmahdollisuutta rakennusten ympäri ei paranneta. Pohjavedenpinnan alenema on 0,1 m noin 200–300 m etäisyydellä uusista rakennuksista. Virtauksen yläjuoksun puolella pohjavedenpinta nousee noin 0,3–0,4 m. Jos maanalaisten tilojen ympärille rakennetaan metrin paksuinen sepelitäyttö, jonka vedenläpäisevyyskerroin on 0,1 m/s, muuttuu tilanne lähes päinvastaiseksi. Tällöin pohjavedenpinta nousisi noin 0,3 m virtauksen alajuoksun puolella ja laskisi noin 0,5–0,6 m virtauksen yläjuoksun puolella. Sepelikerroksen vaikutus pohjavesitaseseen riippuu materiaalin vedenläpäisevyydestä.

Maanalaiset tilat sijoittuvat kalliokynnyksen alueelle, jossa kallionpinta on paikoin korkeammalla kuin pohjavedenpinta. Tällä kohdin maanalaisten tilojen padottavan vaikutuksen suuruus riippuu kallion ruhjeisen pintaosan ja pohjajamareenin vedenläpäisevyydestä. Muualla alueella pohjaveden virtaukseen vaikuttaa merkittävimmin pohjajamareenin päällä olevan hiekka- ja sorakerroksen vedenläpäisevyys.

Avainsanat pohjavesi, pohjaveden virtaus, maanalaiset tilat, numeerinen mallinnus



Author Emma Lottanen

Title of thesis Effect of building underground spaces on groundwater flow in the centre of Tikkurila

Department Transportation and Environmental Engineering

Professorship Soil Mechanics and Foundation Engineering **Code of professorship** Rak-50

Thesis supervisor Leena Korkiala-Tanttu, Professor

Thesis advisor Heikki Kangas, M. Sc. (Tech.)

Date 27.05.2013

Number of pages 78 + 12

Language Finnish

Currently the constructions of three new buildings which have structures extending under the current groundwater table have been started in the centre of Tikkurila. There is a risk that these buildings decrease permanently the level of the groundwater table. The decrease of the level of the groundwater table accelerates the consolidation of the nearby structures founded on ground and the decomposing of wooden piles. The centre of Tikkurila in Vantaa region is situated mostly on soft soil. Decreasing the level of the groundwater table is not permitted which should be taken into account when designing new buildings.

In this study the permanent effects of building underground spaces on groundwater flow in the centre of Tikkurila were investigated. Also it was investigated if a macadam layer built surrounding the new buildings will compensate the groundwater flow around the buildings. A three-dimensional groundwater model of Tikkurila was compiled using finite-element software SoilVision SVFlux. For the study information on the existing underground spaces was collected.

According to the composed groundwater model the new underground spaces will decrease the level of the groundwater table by 0,3 m on the downstream side if no actions to compensate the flow of groundwater around the buildings is carried out. The decrease of the level of the groundwater table will be 0,1 m approximately 200–300 m away from the new underground spaces. On the upstream side the level of the groundwater table will rise about 0,3–0,4 m. If one meter thick macadam layer with permeability of 0,1 m/s is built around the buildings the situation will reverse. Then the level of groundwater will rise 0,3 m on the downstream side and decrease 0,5–0,6 m on the upstream side. The permeability of the material affects how effectively the macadam layer increases the flow of groundwater around the buildings.

The underground spaces are located on a bedrock sill where the bedrock is at some places higher than the level of groundwater table. In this area the permeability of the upper part of bedrock and till affect how great is the barrier effect the underground spaces create. In the other parts of the studied area the groundwater flow is affected mostly by the permeability of the sand and gravel layer.

Keywords groundwater, groundwater flow, underground structures, barrier effect, numerical modelling

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Vantaan kaupungin geotekniikkayksikössä. Työn mallinnusosio on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Leena Korkiala-Tanttua numeerisen mallintamisen mahdollistamisesta ja neuvoista työn aikana. Kiitokset työn ohjaajalle DI Heikki Kankaalle Vantaan kaupungilta mielenkiintoisesta aiheesta ja työn ohjauksesta sekä DI Matti Holtarille Vantaan kaupungilta työn kommentoinnista. Kiitokset myös pohjavesimallin lähtötietojen läpikäynnissä auttaneille Riku Hakoniemelle ja Tuukka Mäki-Torkolle Pöyry Finland Oy:stä.

Kiitos Aalto-yliopiston pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion henkilökunnalle sekä Vantaan kaupungin geotekniikkayksikön henkilöstölle mukavasta työilmapiiristä. Lämpimät kiitokset läheisille ja ystäville tuesta ja kannustuksesta.

Vantaalla 15.05.2013

Emma Lottanen

Sisällysluettelo

| | |
|---|----|
| Tiivistelmä | |
| Abstract | |
| Alkusanat | |
| Sisällysluettelo | 4 |
| Merkinnät ja lyhenteet | 6 |
| 1 Johdanto | 8 |
| 2 Pohjavesi | 10 |
| 2.1 Maanalaiset vesivyöhykkeet..... | 10 |
| 2.2 Pohjaveden muodostuminen..... | 11 |
| 2.3 Maa- ja kallioperän huokoisuus..... | 12 |
| 2.4 Pohjaveden merkitys pehmeikköjen painumien muodostumisessa..... | 13 |
| 2.5 Pohjaveteen liittyvät säädökset..... | 14 |
| 2.6 Maaperä ja pohjaveden muodostumisolosuhteet Tikkurilassa ja sen ympäristössä..... | 15 |
| 3 Pohjaveden virtaus | 18 |
| 3.1 Darcyn laki | 18 |
| 3.2 Jatkuvuusyhtälö | 20 |
| 3.3 Maaperän vedenläpäisevyys..... | 20 |
| 3.3.1 Yleistä | 20 |
| 3.3.2 Vedenläpäisevyyden määrittäminen raejakauman avulla | 22 |
| 3.3.3 Vedenläpäisevyyden määrittäminen laboratorio- tai kenttäkokeilla | 23 |
| 3.4 Vedenpidätyskäyrä | 24 |
| 3.5 Pohjavedenpinnan alentamisen vaikutusalue | 25 |
| 3.6 Vettä läpäisemättömien rakenteiden vaikutus pohjaveden virtaukseen | 26 |
| 4 Pohjavesivirtauksen numeerinen mallinnus..... | 28 |
| 4.1 Yleistä..... | 28 |
| 4.2 Mallinnuksen vaiheet..... | 28 |
| 4.3 Reunaehdot..... | 30 |
| 4.4 Mallin kalibrointi, validointi ja herkkyydentarkastelu | 31 |
| 4.5 FEM-ohjelma SoilVision SVFlux | 32 |
| 5 Kohteen kuvaus: Tikkurilan keskusta-alue | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1 | Kohteen yleiskuvaus..... | 34 |
| 5.2 | Kallioperä | 35 |
| 5.3 | Maaperä | 36 |
| 5.4 | Pohjavesiolosuhteet | 38 |
| 5.5 | Kohteessa sijaitsevat maanalaiset tilat ja pumppaamot..... | 40 |
| 5.5.1 | Uudet maanalaiset tilat | 40 |
| 5.5.2 | Olemassa olevat maanalaiset tilat | 42 |
| 5.5.3 | Pumppaamot..... | 44 |
| 5.6 | Kohteessa ja sen ympäristössä suoritettuja tutkimuksia..... | 44 |
| 6 | Kohteen pohjavesivirtauksen mallintaminen | 47 |
| 6.1 | Laskentaparametrien määrittäminen | 47 |
| 6.2 | Mallinnuksen suorittaminen | 48 |
| 6.3 | Reunaehdot..... | 50 |
| 6.4 | Mallin kalibrointi, herkkyystarkastelu ja validointi | 51 |
| 6.5 | Ennusteajat | 56 |
| 7 | Tutkimustulokset..... | 58 |
| 7.1 | Pohjavesiolot ennen uusien maanalaisten tilojen rakentamista..... | 58 |
| 7.2 | Maanalaisten tilojen vaikutus pohjavesioloihin | 60 |
| 7.3 | Ympäristäytön vaikutus..... | 62 |
| 7.4 | Mallin luotettavuus..... | 64 |
| 7.5 | Tulosten vertailu Pöyryn laatimalla mallilla saatuihin tuloksiin..... | 65 |
| 7.6 | Pohjavedenpinnan alenemisen vaikutus painumien suuruuteen..... | 68 |
| 8 | Johtopäätökset | 70 |
| | Lähdeluettelo..... | 74 |
| | Liiteluettelo | 78 |

Merkinnät ja lyhenteet

| | |
|-----------------|--|
| A | maakerroksen poikkipinta-ala [m^2] |
| A_1 | kaivojen muodostaman ympyrän säde [m] |
| H | paineellisen akviferin paksuus [m] |
| I | hydraulinen gradientti [m] |
| K | väliaineen vedenläpäisevyys [m/s] |
| K_x, K_y, K_z | väliaineen vedenläpäisevyydet suunnissa x, y ja z [m/s] |
| L | pohjaveden kulkema matka [m] |
| M | kokoonpuristuvuusmoduuli |
| Q | virtaama [m^3/s] |
| R | pumppauksen ulottuvuus [m] |
| R_1 | yhden kaivon pumppauksen ulottuvuus [m] |
| S_r | ominaispidättäytyminen [%] |
| S_y | ominaisantoisuus [%] |
| T | vedellä kyllästyneen maakerroksen vedenjohtokyky [m^2/s] |
| U | tasaisuusluku |
| V | kokonaistilavuus [m^3] |
| V_v | väliaineen huokoinen tila [m^3] |
| V_w | veden tilavuus [m^3] |
| b | vedellä kyllästyneen kerroksen paksuus [m] |
| c | kerroin |
| c_v | konsolidaatiokerroin [m^2/a] |
| d_{10} | tehokas raekoko [mm] |
| d_{60} | raejakauman 60 läpäisevyysprosenttia vastaava raekoko [mm] |
| h_p, h | pohjaveden painekorkeus [m] |
| h_1, h_2 | pohjaveden painekorkeus tarkasteltavissa pisteissä 1 ja 2 [m] |
| Δh | pohjavedenpinnan alenema [m] |
| Δh_B | pohjavedenpinnan lasku rakenteen matkalla [m] |
| Δh_N | pohjavedenpinnan lasku luonnollisessa tilanteessa [m] |
| k | vedenläpäisevyyskerroin [m/s] |
| k^{vd} | huokosten vesihöyryn vedenläpäisevyyskerroin [m/s] |

| | |
|-----------------|---|
| n | huokoisuus |
| n_e | tehokas huokoisuus |
| m | moduuliluku |
| m_2^w | veden varastoitumisen kerroin |
| Δp_w | kuormituslisäys [kPa] |
| q | pumpattava vesimäärä kaivosta [m^3/s] |
| r_1, r_2 | pohjaveden havaintoputkien 1 ja 2 etäisyydet pumppauskaivosta [m] |
| s | pohjavedenpinnan alennus [m] |
| s_B | vettäläpäisemättömän rakenteen aiheuttama estevaikutus [m] |
| t | aika |
| u | huokosveden ylipaine [kPa] |
| v | pohjaveden virtausnopeus [m/s] |
| v_e | pohjaveden todellinen virtausnopeus [m/s] |
| v_x, v_y, v_z | pohjaveden virtausnopeudet suunnissa x, y ja z [m/s] |
| z | syvyys maanpinnasta [m] |
| β | jännityseksponentti |
| γ | tilavuuspaino [kN/m^3] |
| γ' | tehokas tilavuuspaino [kN/m^3] |
| γ_w | veden tilavuuspaino [kN/m^3] |
| θ | veden lämpötila [$^{\circ}C$] |
| θ_w | tilavuusvesipitoisuus |
| σ_c | esikonsolidaatiojännitys [kPa] |
| FEM | elementtimenetelmä |
| OCR | ylikonsolidaatioaste |
| SWCC | vedenpidätyskäyrä |
| VWC | tilavuusvesipitoisuus |

1 Johdanto

Rakentaminen vaikuttaa rakennuspaikan ja sen ympäristön luonnolliseen pohjavedenpinnan tasoon sekä pohjaveden muodostumis- ja virtausolosuhteisiin. Rakentamisen vaikutuksia ovat muun muassa:

- Vettäläpäisemättömät rakenteet voivat muuttaa pohjaveden virtaussuuntaa.
- Päälystetyt pinnat vähentävät pohjaveden imeytymistä ja lisäävät pintavaluntaa.
- Työnaikaisten kaivantojen ja pysyvien kellaritilojen kuivatukseen liittyvä pumpaus alentavat pohjavedenpintaa ainakin paikallisesti.
- Putkijohtoverkostot keräävät ja johtavat vettä toisaalle.

Rakentamisen vaikutus pohjavesioloihin on huomattavampi ja pidempiaikaisempi, jos pohjaveden muodostumista ja virtausta rajoittavia tekijöitä on samaan aikaan useita.

Ongelmallisia ovat erityisesti pehmeikköalueet, joilla sijaitsee maanvaraisia tai puupaalujen varaan perustettuja rakennuksia ja rakenteita. Pohjaveden aleneminen alkuperäisestä tasosta kiihdyttää maanvaraisten rakennusten ja rakenteiden painumista sekä puupaaluperustusten lahoamista.

Tikkurilan keskusta-alue Vantaalla sijoittuu pääosin pehmeikköalueelle, ja alueella pohjaveden muodostuminen on vähäistä. Tikkurilan alueella varsinainen pohjavesi virtaa saven alaisissa kitkamaakerroksissa ja mahdollisesti myös kallioperän ruhjeissa. Tikkurilan keskustassa ei saa pysyvästi alentaa pohjavedenpintaa, ja pohjavesitaseen turvaaminen on huomioitava alueelle rakennettavien kohteiden suunnittelussa.

Tikkurilan keskustassa rakennetaan nyt vilkkaasti, ja kolmen rakenteilla olevan rakennuksen rakenteet ulottuvat vesipainerakenteisina kallionpintaan saakka. Pinta-alaltaan suurin Tikkurilaan rakentuvista kohteista on kaksikerroksinen, maanalainen pysäköintilaitos Tikkuparkki. Lisäksi keskusta-alueelle rakenteilla olevan asemakeskus Dixin kellaritilat ja Ratakujan pysäköintitalon alin kerros ulottuvat nykyisen pohjavedenpinnan alapuolelle. Riskinä on, että nämä uudet rakennukset alentavat pohjavedenpintaa pysyvästi.

Tyypillisesti rakennuskohteissa tarkastellaan vain yhden rakennuksen vaikutuksia pohjaveteen. Kuitenkin Tikkurilaan on rakenteilla lähes samanaikaisesti kolme uutta mer-

kittävän kokoista rakennusta. Rakennuskohteiden suunnittelulta on vaadittu, etteivät rakennukset alenna pohjavedenpintaa. Vantaan kaupungin tehtäväksi on kuitenkin jäänyt kokonaisuuden tarkastelu.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää uusien maanalaisten tilojen rakentamisen pitkäaikaisia vaikutuksia Tikkurilan keskusta-alueen pohjavedenpinnan tasoon ja pohjaveden virtaukseen. Lisäksi tarkasteltiin, parantaako rakennusten ympärille rakennettava sepelitäyttö pohjaveden virtausta rakennusten ympäri. Maanalaisilla tiloilla tässä työssä tarkoitetaan pohjavedenpinnan alapuolelle ulottuvia rakennuksia.

Pohjaveden laatuun liittyviä kysymyksiä työssä ei käsitellä, vaan huomio on kiinnitetty pohjavedenpinnan korkeuden vaihteluihin ja pohjavesitaseseen. Rakentamisen vaikutuksista on tarkasteltu pysyvien rakenteiden vaikutuksia pohjavedenpinnan tasoon ja virtausmahdollisuuksiin. Pohjaveden oletetaan virtaavan vain vedellä kyllästyneessä vyöhykkeessä.

Tutkimuksen kohteena oli Tikkurilan keskusta-alue, josta tässä työssä laadittiin kolmiulotteinen pohjavesimalli elementtimenetelmään perustuvalla SoilVision SVFlux -ohjelmalla. Malli tehtiin pysyvän tilan mallina eli tilanteessa, jossa pohjavesi on saavuttanut tasapainotilan. Lähtötietoina työssä käytettiin Tikkurilan alueen pohjavesihavain-
toja, kairaus- ja näytetietoja, rakennussuunnitelmia, pohjaveden hallintasuunnitelmia ja suunnitelmien yhteydessä tehtyjä tutkimuksia. Tutkimusta varten koottiin tietoa myös Tikkurilassa ennestään olevista, pohjaveteen mahdollisesti vaikuttavista maanalaisista tiloista.

Mallinnuksen lähtötilanteena on käytetty vuotta 2010, jolloin työssä tarkasteltavien uusien maanalaisten tilojen rakentaminen ei ollut vielä alkanut. Diplomityön valmistumisen aikoihin osan työssä tarkasteltavien rakennusten rakentaminen oli vielä kesken, ja työssä tarkasteltiin kohteiden pitkän ajan yhteisvaikutusta pohjavesioloihin mallintamalla.

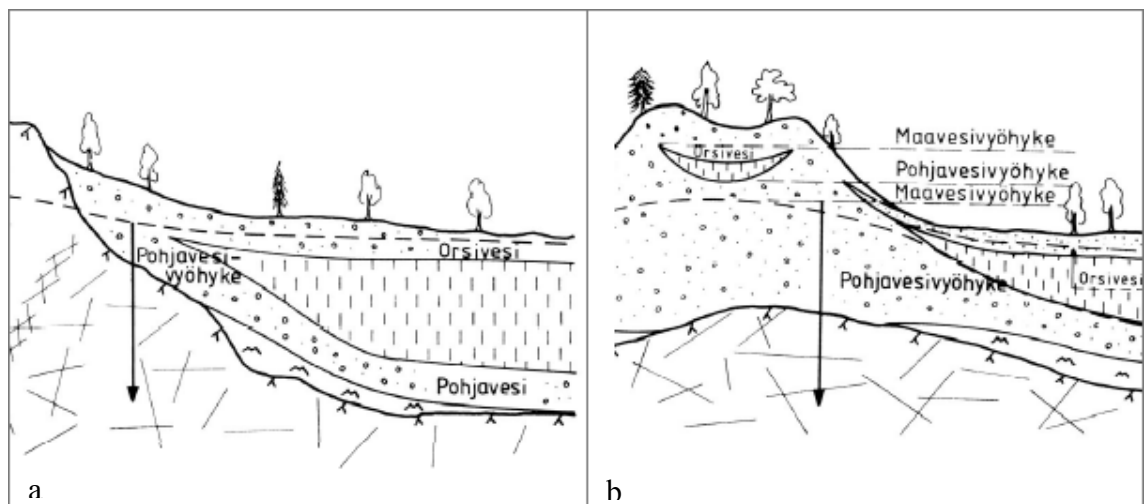
Työssä käytetty korkeusjärjestelmä on N43 ja tasokoordinaatisto VVJ.

2 Pohjavesi

2.1 Maanalaiset vesivyöhykkeet

Pohjavedenpinta on taso, jolla maa- ja kallioperän huokosissa olevan veden paine on ilmakehän paineen suuruinen. Pohjavedenpinta noudattaa loivasti maastonmuotoja ja yhtyy pintavesiin soilla, lähteissä, vesistöissä ja vesijätöillä (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 37). Pohjavedenpinta on Suomessa keskimäärin 2...4 m syvyydessä maanpinnasta. Pohjavedenpinnan keskimääräistä syvyyttä alentavat harjualueet, joilla pohjavedenpinta voi olla jopa 30–50 m syvyydessä. (Airaksinen 1978, s. 50.) Koheesiomaalueilla pohjavedenpinta on yleensä noin metrin syvyydellä maanpinnasta. Pohjavedenpinnan luonnollinen vuosivaihtelu on noin 0,1...1,0 m luokkaa, mutta voi olla suurempikin (Airaksinen 1978, s. 23, 51).

Pohjavedenpinnan yläpuolista, huokostilan osin kyllästämää vettä kutsutaan maavedeksi. Varsinaisen pohjavesikerroksen yläpuolella voi sijaita erillinen veden kyllästämä vyöhyke, jota sanotaan orsivedeksi (kuva 1).



Kuva 1. Pohjavesivyöhykkeet. a) Orsivesi on samassa vyöhykkeessä, b) orsivesi on erillään. (muokattu Kairausopas IV 1987, s. 5.)

Pohjavesiesiintymästä käytetään joissain yhteyksissä nimitystä akviferi. Akviferi on vapaapintainen, jos se on yhteydessä ilmakehään ilmavirtauksen sallivan väliaineen, kuten hiekan kautta. Akviferi on paineellinen, jos sen pinta rajoittuu huonosti vettä läpäisevään kerrokseen, esimerkiksi saveen. Huonosti vettä läpäisevä kerros estää pohja-

vedenpintaa nousemasta vesimassan, ilmanpaineen ja geologisen ympäristön säätelemälle painetasolle. Jos huonosti vettä läpäisevä kerros puhkaistaan, vesi nousee ympäristön olosuhteiden vaatimaan painetasoon. Tätä korkeutta sanotaan painekorkeudeksi h_p (Aalto 1985, s. 414). Jos vedenpinta nousee pohjaveden havaintoputkessa maanpinnan tasoa korkeammalle, sanotaan akviferia arteesiseksi. (Mälkki 1999, s.33.)

Kalliopohjavesi on kallion rakosysteemeissä olevaa vettä, ja sitä esiintyy kalliossa noin 100 m syvyyteen saakka. Varsinaiset kalliopohjavesialtaat muodostuvat ruhjeista ja ovat pitkänomaisia. Kallioakvifereja on runsaasti, mutta ne ovat pieniä, niiden veden varastotilavuus ja syvyysulottuvuus on pieni, ja niiden hydrologinen kierto on pienialainen ja lyhytaikainen. Kivilajilla ei ole katsottu olevan vaikutusta kalliopohjaveden antoisuuteen, mutta esimerkiksi graniitin vaakarakoilu voi edesauttaa pohjaveden kerääntymistä. (Korkka-Niemi & Salonen, 1996. s. 53–54.) Syväkivien pintaosissa esiintyy usein pinnanmyötäinen rakoilu, joka säätelee kalliopohjaveden pinnan korkeutta. Pinnanmyötäinen rakoilu muodostaa johtorakoryhmän, joka yhdistää muuta rakoilua. (Mälkki 1999, s. 58.)

2.2 Pohjaveden muodostuminen

Pohjavettä muodostuu veden imeytyessä maankamaraan ja kulkeutuessa ylemmistä maakerroksista pohjavesikerrokseen. Pohjavettä muodostuu pääasiassa sadevedestä ja jonkin verran vesistöistä tulevasta vedestä. Muodostuvan pohjaveden määrään vaikuttavat muun muassa sateen määrä ja kesto, maa- ja kallioperän vedenläpäisevyys, maaston muoto ja kaltevuus, onko maanpinta luonnontilainen vai muokattu, kasvillisuus, päällysteet ja mahdollinen viemärointi. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 26.)

Suomessa sadanta on keskimäärin 500–750 mm vuodessa, josta lumena sataa keskimäärin 200–250 mm. Noin puolet vuosisadannasta eli noin 300–400 mm/v imeytyy maa-vesivyöhykkeeseen, josta suurin osa kuitenkin haihtuu takaisin ilmakehään maanpinnasta ja kasveista. (Airaksinen 1978, s. 21–23). Pohjaveden muodostuminen on runsasta niukkakasvuisilla ja runsaasti rakoilleilla kalliopaljastumilla ja paljailla sora-alueilla, joilla haihtuminen ja pintavalunta on vähäistä. Kalliopaljastumilla kalliolle satavasta vedestä osa kulkeutuu suoraan kallion rakosysteemeihin, osa valuu paljastumaa reunustaville maakerroksille ja osa haihtuu kallion pinnalta. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 26–27.)

Pohjaveden muodostuminen on suurinta keväällä lumen ja roudan sulaessa. Kesällä pohjavettä muodostuu vähän, koska haihdunta on suurta ja kasvillisuus käyttää vettä. Talvella pohjaveden muodostumista rajoittaa maaperän routautuminen ja sadannan sataminen lumena. Pohjavettä muodostuu käytännössä vain suojasään aikana. (Airaksinen 1978, s. 23.)

Pohjaveden muodostumiseen vaikuttaa ennen kaikkea maaperän vedenläpäisevyys. Moreenin vedenläpäisevyys vaihtelee ja riippuu moreenin tiiveydestä, rakenteesta ja kasvi- peitteestä. Moreenimailla yleensä noin 10–30 % sateesta imeytyy pohjavedeksi, mutta ylävillä ja karkearakeisilla moreenimailla jopa yli 50 % sadannasta voi imeytyä pohjavedeksi. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 26.)

Hienorakeisilla maalajeilla pohjaveden muodostuminen on vähäistä. Vettä imeytyy pääasiassa siltteihin ja kerrallisiin saviin sekä paremmin vettä johtavien kerrosten, halkeamien ja onteloiden välityksellä. Hienorakeisilta maa-alueilta suurin osa sadevesistä valuu pinta- ja pintakerrosvaluntana muualle. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 26–27.)

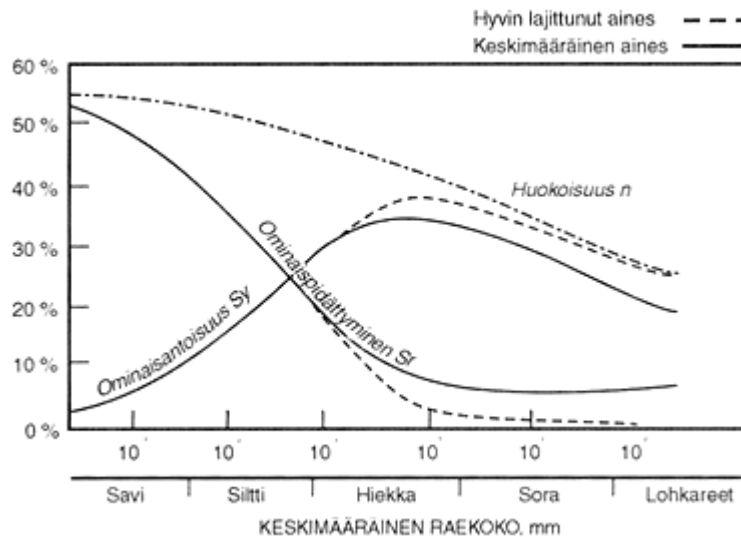
2.3 Maa- ja kallioperän huokoisuus

Huokoisuus n on huokoisen tilan V_v suhde väliaineen kokonaistilavuuteen V . Maaperän huokoisuuteen vaikuttavat maalajien raekokojakauma, rakeiden lajittuneisuus, maan tiiviysaste ja sementoituminen. Lajittuneisuus parantaa huokoisuutta ja sekoittuneisuus puolestaan huonontaa sitä. Moreenin huokoisuus on parhaimmillaankin vain 17 %, kun taas tasarakeisella hiekalla se on 25–50 %. Saven huokoisuus voi olla jopa 90 %. Maaperän oma paino aiheuttaa etenkin savissa luonnollista tiivistymistä, minkä johdosta huokoisuus pienenee maaperässä alaspäin mentäessä. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 29.)

Kallion huokoisuuteen vaikuttavat etenkin rakoilun määrä, rakojen koko ja täytteisyys. Kallion huokoisuus on tyypillisesti 0,1–0,5 % riippuen rakoilun määrästä. Kiteisen ja ruhjeisen kallioperän huokoisuus vaihtelee välillä 0–10 %. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 29.)

Väliaineen läpi kulkevan veden kannalta merkityksellisiä ovat vain toisiinsa yhteydessä olevat huokoset, raot ja halkeamat. Toisiinsa yhteydessä olevat huokoset voidaan huomioida tehokkaalla huokoisuudella n_e , joka on toisiinsa yhteydessä olevien huokosten ja väliaineen kokonaistilavuuden suhde. (Airaksinen 1978, s. 36.)

Tehokas huokoisuus rinnastetaan kirjallisuudessa toisinaan ominaisantoisuuteen S_y (Airaksinen 1978, s. 36). Ominaisantoisuus kuvaa akviferista painovoiman vaikutuksesta poistuvaa vesimäärää. Akviferiin painovoimaa vastaan jäävää eli vapaata vettä tiukemmin sitoutunutta vesimäärää kuvaa ominaispidätyminen S_r . Huokoisuuden, ominaisantoisuuden ja ominaispidätyvyyden liittymistä eri maalajeihin on havainnollistettu kuvassa 2. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 41.)



Kuva 2. Huokoisuus, ominaisantoisuus ja ominaispidätyminen eri maalajeilla. (Airaksinen 1978, s. 42.)

2.4 Pohjaveden merkitys pehmeikköjen painumien muodostumisessa

Pohjavedenpinnan aleneminen lisää kokoonpuristuvien maakerrosten kuormitusta. Δh :n pohjavedenpinnan aleneminen aiheuttaa kaavan (1) mukaisen kuormituslisäyksen Δp_w . (Helenelund 1974, s. 82.)

$$\Delta p_w = \gamma_w \Delta h \quad (1)$$

missä γ_w on veden tilavuuspaino [kN/m^3].

Kun maapohjalle lisätään tasainen kuorma, aiheuttaa se maapohjan savikerrokseen huokosveden ylipaineen. Huokosvesi alkaa poistua savikerroksesta, ja huokosveden ylipaine pienenee vähitellen. Huokosveden poistuminen aiheuttaa maapohjan tilavuuden pienenemistä, minkä seurauksena tapahtuvaa maan painumista sanotaan konsolidaatiopainumaksi. Hienorakeisilla maalajeilla konsolidaatiopainuma muodostaa huomattavan osan maakerroksen kokonaispainumasta. (Korhonen 1985, s. 282.)

Painumien laskentaan on kehitetty useita teorioita ja laskentamenetelmiä. Maan konsolidaatiopainuman nopeus voidaan laskea esimerkiksi Terzaghin yksiulotteisella konsolidaatioteorialla. Terzaghin konsolidaatioteoria voidaan ilmaista kaavalla (2). Yhtälössä esiintyvä konsolidaatiokerroin c_v saadaan kaavalla (3). (Korhonen 1985, s. 288.)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (2)$$

| | | |
|-------|--------|-----------------------------------|
| missä | u on | huokosveden ylipaine [kPa] |
| | t | aika konsolidaatiopainuman alusta |
| | z | syvyys maanpinnasta [m]. |

$$c_v = \frac{Mk}{\gamma_w}, \quad (3)$$

| | | |
|-------|--------|-------------------------------|
| missä | k on | vedenläpäisevyyskerroin [m/s] |
| | M | kokoonpuristuvuusmoduuli. |

2.5 Pohjaveteen liittyvät säädökset

Pohjaveden huomioimisesta rakentamisen yhteydessä on annettu määräykset Vantaan kaupungin rakennusjärjestyksessä. Rakennusjärjestyksen (2011) luvussa 53 § *Pohjaveden huomioon ottaminen rakentamisessa* sanotaan, että ennen rakentamista on tutkittava rakentamisen vaikutukset pohjaveden laatuun, korkeusasemaan ja virtausmahdollisuuksiin. Jos pohjavettä alennetaan pysyvästi, on aina laadittava pohjaveden hallintasuunnitelma, josta on käytävä ilmi pohjaveden alentamisen vaikutukset ympäristön rakenteisiin, kasvillisuuteen ja kunnallistekniikkaan. Yleensäkin on rakentaminen suunniteltava ja suoritettava siten, että sen haitalliset vaikutukset pohjaveden laatuun, korkeusasemaan tai muodostumiseen ovat mahdollisimman vähäiset.

Rakennusjärjestyksen (2011) luvun 55 § *Puisten perustusrakenteiden huomioon ottaminen rakentamisessa* mukaan alueilla, joilla on puupaaluperusteisia rakennuksia tai muita puisia rakenteita, rakentaminen ei saa haitallisesti muuttaa vallitsevia pohjaveden pinnan tasoja eikä estää pohjaveden virtausmahdollisuuksia. Tällaisilla alueilla lyhytaikainenkin pohjavedenalennus edellyttää pohjaveden hallintasuunnitelmaa ja pohjaveden tarkkailua.

Maanalaisista tiloista sanotaan rakennusjärjestyksen (2011) luvussa 58 § *Maanalainen rakentaminen*, että maan alle rakennettaessa on tutkittava riittävässä laajuudessa rakentamisen vaikutukset kohteen ympäristöön. Kohteen ympäristössä olemassa olevien maanpäällisten ja maanalaisten rakenteiden turvallisuuteen on erityisesti kiinnitettävä huomiota.

Ympäristöministeriön asetuksessa pohjarakenteista (2004, s. 6) huomautetaan, että pohjavesialtaan laajuus ja pohjaveden korvautuvuus on selvitettävä, jos muutos pohjavedenpinnan korkeudessa voi aiheuttaa haittaa lähellä sijaitseville rakennuksille, rakenteille tai luonnolle. Pohjavedenpinnan vaihteluiden selvittäminen on erityisen tärkeää, kun suunnitellaan ylimmän pohjavedenpinnan alapuolelle ulottuvia tiloja. (Ympäristöministeriö 2004, s. 6).

2.6 Maaperä ja pohjaveden muodostumisolosuhteet Tikkurilassa ja sen ympäristössä

Vantaan maaperä on muotoutunut suurimmalta osalta noin 10 000 vuotta sitten päättyneen viimeisimmän jääkauden aikana. Mannerjäätikön etenemis- ja sulamisvaiheiden seurauksena syntyivät moreenikerrokset, jotka peittävät tai myötäilevät kallionpinnan muotoja tai esiintyvät erilaisina moreenimuodostumina. Mannerjäätikön sulamisvedet kerrostivat maa-ainesta myös harjuiksi tai jäätikön reunan eteen reunadeltoiksi. (GTK 1997, s. 1.)

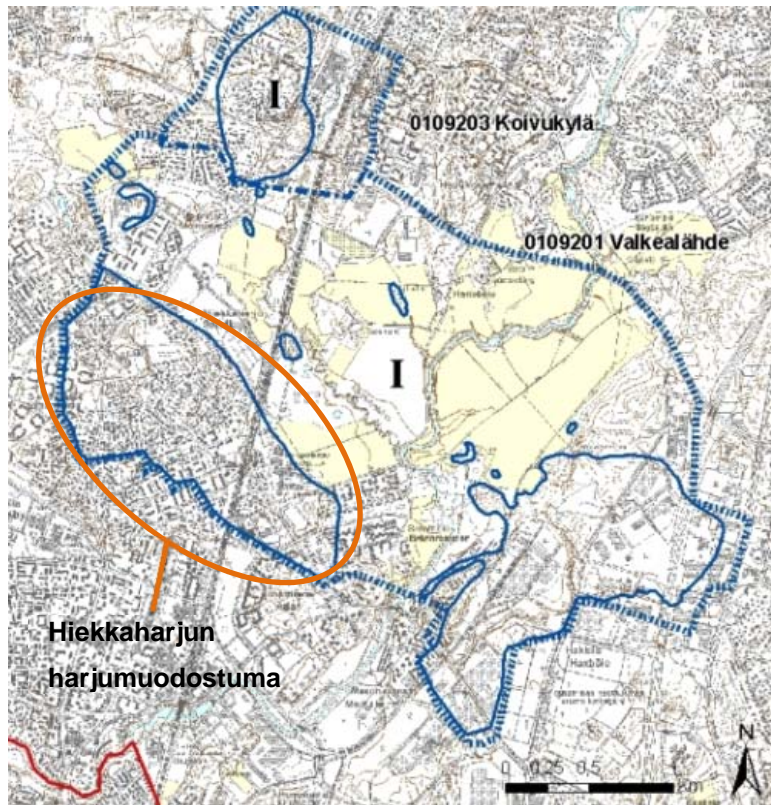
Mannerjäätikön vetäydyttyä Vantaan maanpinta jäi veden alle ja muinaiset Itämerivaiheet alkoivat muovata maaperää. Muinaisten Itämerivaiheiden aikana kerrostuivat savi-kerrokset moreeni- ja hiekkakerrosten päälle. Makeaan tai vähän suolaiseen veteen kerrostuneet savet olivat niin sanottuja lustosavia, joiden humuspitoisuus on pieni. Järvi- ja merivaiheiden vuorotellessa muodostui myös tasalaatuista ja sulfideja sisältävää savea.

Viimeisimpien Itämerivaiheiden aikana syntyi tasalaatuista ja humuspitoista savea eli liejusavea. (GTK 1997, s. 1–2, 5.)

Mannerjäätikön aiheuttaman painon poistuttua maankuori alkoi kohota kohti jääkausia edeltäneeseen asemaansa. Vedestä nousseita maa-alueet altistuivat rantavoimien vaikutuksille, minkä seurauksena moreenikerrostumat kuluivat, ja niiden alta paljastui kallio. Paikoin mäkien yläosien moreenista syntyi rantakerrostumahiekkaa, josta osa kulkeutui lähiympäristöön. Maa kohosi aluksi nopeasti ja samalla vedenpinta laski. Noin 9 500 vuotta sitten vedenpinta alkoi nousta useita metrejä ja hidasti maankohoamisen aiheuttamaa rannansiirtymistä. (GTK 1997, s. 1–3.)

Pohjaveden muodostumiselle suotuisia alueita ovat alueet, joilla hyvin vettä johtava kerros ulottuu maanpintaan saakka. Tällaisia alueita ovat muun muassa Hiekkaharjun luode-kaakko-suuntainen harjumuodostuma, joka on nähtävissä liitteen 1 maaperäkartassa. Hiekkaharjun muodostuma on osa Valkealähteen pohjavesialuetta, joka on luokiteltu vedenhankintaa varten tärkeäksi pohjavesialueeksi. Valkealähteen pohjavesialueen kokonaispinta-ala on 8,14 km² ja muodostumisalueen pinta-ala on 2,83 km². Valkealähteen pohjavesialueella on arvioitu muodostuvan pohjavettä keskimäärin 2500 m³/d. (Kivimäki 2010, s. 13, 16.)

Hiekkaharjun muodostuma sijaitsee Valkealähteen pohjavesialueen lounaisosassa (kuva 3), ja muodostuma on yksi pohjaveden varsinaisista muodostumisalueista. Hiekkaharjun muodostuman alue on lähes täyteen rakennettu. Onkin arvioitu, että Hiekkaharjun alueen rakentaminen on alentanut alueen pysyvää pohjavedenpintaa.



Kuva 3. Valkealähteen pohjavesialue, jonka lounaisosassa sijaitseva Hiekkaharjun harjumuodostuma on yksi pohjavesialueen varsinaisista pohjaveden muodostumisalueista. (SYKE 2011.)

Pohjaveden muodostumisalueilla rakentaminen ja erityisesti piha-alueiden hule- ja kattovesien ohjaaminen viemäriin vähentävät pohjaveden muodostumismääriä. Pohjaveden muodostumisen turvaaminen hulevesien hallinnassa on useilla alueilla alettu huomioida vasta kun suurin osa alueesta on jo rakennettu. Viime vuosina hulevesien vähentämiseen ja hulevesien imeyttämiseen osana hulevesien hallintaa on alettu kiinnittää enemmän huomiota, ja hulevesien hallinnasta on ohjeistettu muun muassa Kuntaliiton julkaisemassa *Hulevesioppaassa* (2012).

3 Pohjaveden virtaus

3.1 Darcyn laki

Pohjaveden virtauksen teorioissa seuraavat oletukset ovat voimassa:

- Huokosvesi on homogeenista ja kokoonpuristumatonta.
- Raeaines on kokoonpuristumatonta.
- Raerungon liikenopeus on lähes olematon vesipartikkelien keskimääräiseen nopeuteen verrattuna.
- Virtaus tapahtuu vedellä kyllästetyssä maassa tai kalliossa. (Aalto 1985, s. 413.)

Pohjavesivyöhykkeen vesi virtaa pohjavedenpinnan vieton eli gradientin suuntaan. Pohjaveden virtaus voidaan ilmaista Darcyn lain (kaava 4) avulla. Darcyn laki on voimassa laminaarisella virtauksella. Erittäin hienorakeisissa maalajeissa Darcyn lakia ei voida soveltaa ennen kuin maalajille ominainen hydraulisen gradientin kynnysarvo on ylitetty. (Airaksinen 1978, s. 60–65.) Darcyn lakia on havainnollistettu kuvassa 4.

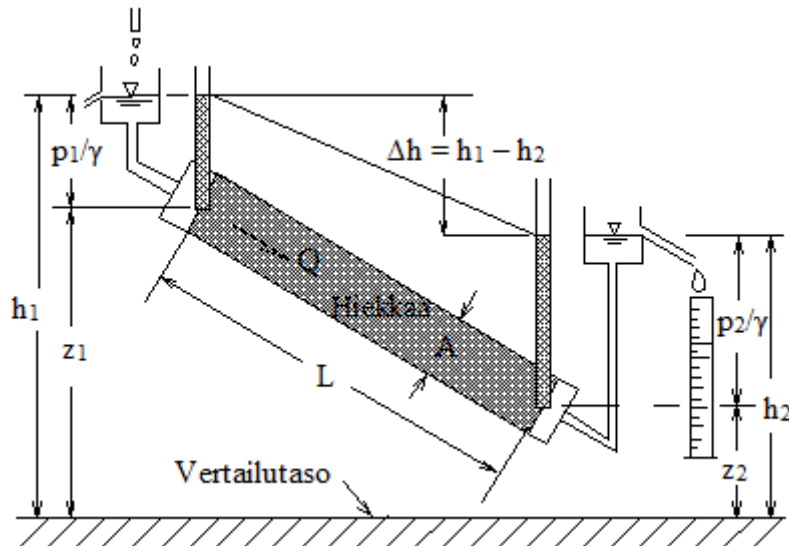
$$Q = K \cdot A \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} = K \cdot A \cdot I , \quad (4)$$

| | | |
|-------|---------------------------------|--|
| missä | Q on | virtaama [m ³ /s] |
| | K | vedenläpäisevyys [m/s] |
| | A | maakerroksen poikkipinta-ala [m ²] |
| | h ₁ , h ₂ | painekorkeus tarkasteltavissa pisteissä 1 ja 2 [m] |
| | L | pohjaveden kulkema matka [m] |
| | I | hydraulinen gradientti eli (h ₁ – h ₂)/L. |

Yksinkertaisessa muodossa Darcyn laki voidaan esittää kaavalla (5). (Todd 1959, s. 46.)

$$v = \frac{Q}{A} = K \cdot I , \quad (5)$$

| | | |
|-------|------|---------------------------------|
| missä | v on | pohjaveden virtausnopeus [m/s]. |
|-------|------|---------------------------------|



Kuva 4. Darcyn koejärjestelyn periaate. (muokattu Airaksinen 1978, s. 61).

Koska vesi virtaa vain tehokkaassa huokostilassa, veden todellinen nopeus v_e huokoisessa maaperässä saadaan kaavasta (6) (Cedergren 1977, s. 87; Airaksinen 1978, s. 59.)

$$v_e = \frac{K \cdot I}{n_e} \quad (6)$$

Väliaine voi olla anisotrooppista, jolloin väliaineen vedenläpäisevyys vaihtelee eri suunnissa. Veden virtausnopeus anisotrooppisessa väliaineessa voidaan ilmaista eri komponenteille kaavalla (7). (Todd 1959, s. 62.)

$$v_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (7)$$

missä h on pohjaveden painekorkeus [m]
 v_x, v_y ja v_z pohjaveden virtausnopeudet suunnissa x, y ja z [m/s]
 K_x, K_y ja K_z vedenläpäisevyydet suunnissa x, y ja z [m/s].

Usein kuitenkin yksinkertaisuuden vuoksi käsitellään isotrooppista väliainetta, jonka vedenläpäisevyys on vakio eri suunnissa. Tällöin kaava (7) voidaan ilmaista muodossa

$$v = K \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = K \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v = K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (8)$$

3.2 Jatkuvuusyhtälö

Pohjaveden virtaukselle pätee jatkuvuusyhtälö (kaava 9), jonka mukaan maa-alkioon tulevan vesimäärän on oltava sama kuin alkioista poistuva vesimäärä (Aalto 1985, s. 423). Pysyvässä virtauksessa virtaus ei riipu ajasta (kaava 10). (Todd 1959, s. 62.)

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{V} \frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Kun jatkuvuusyhtälöön sovelletaan Darcyn lakia, saadaan Laplacen yhtälö (kaava 11). Laplacen yhtälö soveltuu kolmiulotteisen, stationäärisen suotovirtauksen kuvaamiseen. (Todd 1959, s. 62; Cedergren 1977, s. 93.)

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

Tarkasteltaessa isotrooppista väliainetta, voidaan Laplacen yhtälö esittää kaavalla (12). (Cedergren 1977, s. 93.)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

3.3 Maaperän vedenläpäisevyys

3.3.1 Yleistä

Vedenläpäisevyys kuvaa väliaineen läpi kulkevan veden määrää aikayksikössä, ja sen suuruuteen vaikuttavat huokoisen väliaineen ominaisuudet sekä virtaavan nesteen ominaispaino ja dynaaminen viskositeetti (Airaksinen 1978, s. 66–67). Eri maalajien vedenläpäisevyyksiä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Vedenläpäisevyyskerroin eri maalajeilla (SYKE 2010.)

| Maalaji | Vedenläpäisevyyskerroin k | | Kokonais- huokoisuus n [%] | Ominais- antoisuus S _y [%] |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------------------------|---|
| | [m/s] | [m/d] | | |
| Sora | 10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴ | 10000 - 10 | 25 - 50 | 25 - 37 |
| Karkea sora | > 1 | > 100000 | 24 - 36 | 23 |
| Keskikarkea sora | 1 - 10 ⁻² | 100000 - 1000 | | 24 |
| Hieno sora | 1 - 10 ⁻³ | 100000 - 100 | 25 - 38 | 25 |
| Hiekkainen sora | 10 ⁻² - 10 ⁻⁶ | 1000 - 0,1 | | |
| Hiekka | 10 ⁻² - 10 ⁻⁶ | 1000 - 0,1 | 25 - 50 | 25 - 38 |
| Karkea hiekka | 10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴ | 10000 - 10 | 30 - 46 | 27 |
| Keskikarkea hiekka | 10 ⁻² - 10 ⁻⁵ | 1000 - 1 | 30 - 40 | 28 |
| Hieno hiekka | 10 ⁻³ - 10 ⁻⁶ | 100 - 0,1 | 26 - 53 | 10 - 28 |
| Siltti | 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁹ | 1 - 0,0001 | 35 - 61 | 8 |
| Karkea siltti | 10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶ | 10 - 0,1 | 30 - 35 | |
| Hieno siltti | 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁸ | 1 - 0,001 | 40 - 50 | |
| Savi | < 10 ⁻⁸ | < 0,001 | 34 - 70 | 3 - 10 |
| Laiha savi | | | 40 - 60 | |
| Lihava savi | | | 60 - 75 | |
| Moreeni | | | 20 - 55 | |
| Soramoreeni | 10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁷ | 10 - 0,01 | | 16 |
| Hiekkamoreeni | 10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁸ | 0,1 - 0,001 | | 16 |
| Silttimoreeni | 10 ⁻⁷ - 10 ⁻¹⁰ | 0,001 - 0,00001 | | 6 |

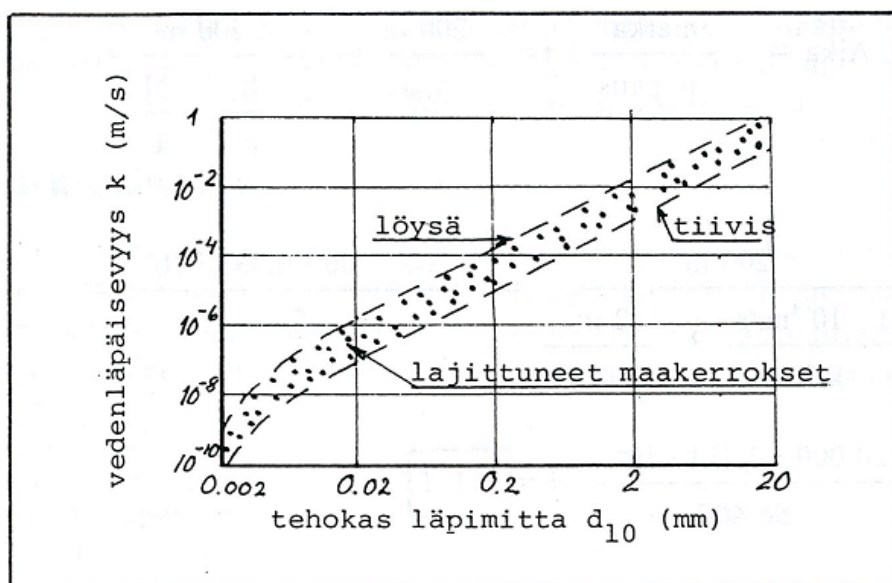
Maakerroksen kykyä kuljettaa vettä voidaan ilmaista vedenjohtokyvyn T avulla, jossa T kuvaa koko vedellä kyllästyneen kerroksen vedenjohtokykyä (kaava 13). Hyvän akviferin vedenjohtokyky on noin 10 000 m²/vrk. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, s. 41.)

$$T = K \cdot b , \quad (13)$$

missä T on vedenjohtokyky [m²/s]
b kerrospaksuus [m].

3.3.2 Vedenläpäisevyyden määrittäminen raekokojen avulla

Maakerroksen vedenläpäisevyys voidaan alustavasti arvioida seulontakäyrän tehokkaan raekoon d_{10} avulla. Tehokas raekoko on raekokojen 10 läpäisevyysprosenttia vastaava raekoko. (Helenelund 1974, s. 35.) Tehokkaan raekoon ja maaperän vedenläpäisevyyskerroin välistä yhteyttä on kuvattu kuvassa 5.



Kuva 5. Maalajin tehokkaan raekoon d_{10} vaikutus maaperän vedenläpäisevyyteen. (Rantamäki et al 1992, s. 102.)

Hiekan vedenläpäisevyyskerroin voidaan määrittää likimääräisesti maalajin tehokkaan raekoon avulla kaavalla (14). (Aalto 1985, s. 418.)

$$k = c \cdot d_{10}^2 (0,7 + 0,03\theta), \quad (14)$$

missä c on kerroin, joka vaihtelee välillä 0,006...0,015
 θ veden lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Tasarakeisen hiekan vedenläpäisevyys voidaan määrittää Hazenin kaavalla (15). (Airaksinen 1978, s. 129.)

$$k = 0,01157 \cdot d_{10}^2 \quad (15)$$

Hazenin kaava on voimassa, kun maalajin tasaisuusluku U on alle 5. Tasaisuusluku saadaan kaavalla (16). (Airaksinen 1978, s. 127.)

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (16)$$

missä d_{60} raejakauman 60 läpäisevyysprosenttia vastaava raekoko [mm].

3.3.3 Vedenläpäisevyyden määrittäminen laboratorio- tai kenttäkokeilla

Laboratoriossa karkeiden maalajien vedenläpäisevyys voidaan määrittää vakio paineko-keella, jossa laitteen painekorkeus pidetään kokeen ajan muuttumattomana. Hienora-keisten maalajien vedenläpäisevyyden määrittämiseen soveltuu muuttuvapainekoe, jossa laitteeseen ei kokeen alkamisen jälkeen enää lisätä vettä, vaan painekorkeus muuttuu kokeen aikana. (Korhonen 1974, s. 34.)

Kentällä voidaan suorittaa koepumppaus, jossa kaivoon pumpataan vettä tai sitä pumpataan kaivosta pois, ja samanaikaisesti pohjavedenpinnan muutosta seurataan useassa läheisessä havaintoputkessa tai kaivossa. Pumppausta jatketaan, kunnes tasapainotila saavutetaan. (Cedergren 1977, s. 53.)

Säteittäisen virtauksen suuntautuessa pohjavesimuodostumaan ulottuvaa kaivoa kohti, Darcyn lain ja Dupuitin oletuksen avulla voidaan johtaa yksinkertainen kaivoyhtälö. Dupuitin oletuksen mukaan, vapaan pohjaveden hydraulinen gradientti on vakio pystysuuntaisen poikkileikkauksen kaikissa pisteissä, ja gradientti on sama kuin vapaan pohjavedenpinnan kaltevuus. (Cedergren 1977, s. 53.)

Kun etäisyyksillä r_1 ja r_2 olevissa havaintoputkissa mitatut pohjavedenpinnan korkeudet ovat h_1 ja h_2 , on vedenläpäisevyyskerroin vapaalle akviferille määritettävissä kaavalla (17). (Craig 1974, s. 35.)

$$k = \frac{q \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi \cdot (h_2^2 - h_1^2)}, \quad (17)$$

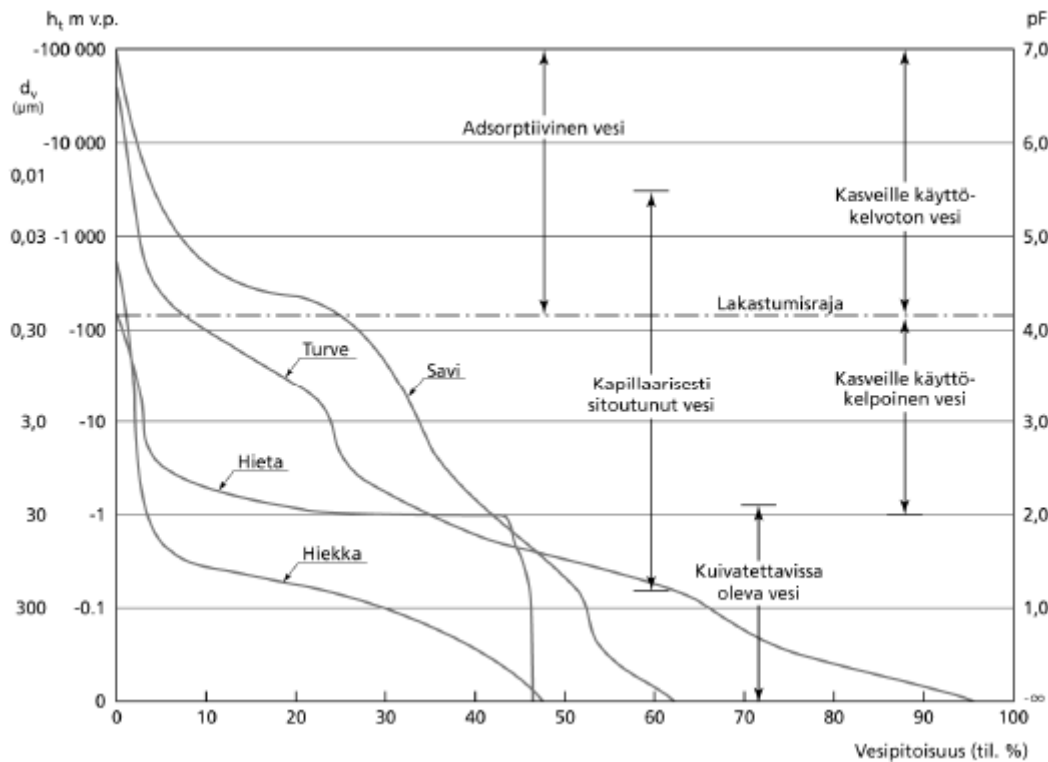
missä q on pumpattava vesimäärä kaivosta [m^3/s].

Paineellisen akviferin, jonka paksuus on H , vedenläpäisevyyskerroin saadaan kaavasta (18). (Craig 1974, s. 35.)

$$k = \frac{q \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot (h_2 - h_1)} \quad (18)$$

3.4 Vedenpidätyskäyrä

Maan vedenpidätyskäyrä kuvaa maan kykyä sitoa vettä. Vedenpidätyskäyrällä esitetään maan kosteuden ja matrikpotentiaalin välistä yhteyttä (kuva 6). Matrikpotentiaali on pohjavedenpinnan yläpuolella oleva negatiivinen painepotentiaali, kun pohjavedenpinnan yläpuolella vallitsee veden alipaine. (Vakkilainen 1986, s. 84–85.)



Kuva 6. Eri maalajien vedenpidätyskäyriä. (Vakkilainen 1986, s. 85.)

Maan vedenpidätyskäyrä määritetään kohdistamalla kyllästettyyn maanäytteeseen alipainetta eli imua. Imun vaikutuksesta maanäyte alkaa luovuttaa siihen sitoutunutta vettä ensin suurimmista huokosista. Kun imua kasvatetaan, yhä pienemmät huokokset alkavat luovuttaa vettä. (Vakkilainen 1986, s. 85.)

Osittain vedellä kyllästyneessä maaperässä vedenläpäisevyys on pienempi kuin vedellä kyllästyneessä maaperässä. Vedenpidätyskäyrää voidaan käyttää osittain vedellä kyllästyneen maaperän vedenläpäisevyyden määrittämiseen. (Vakkilainen 1986, s. 92.)

3.5 Pohjavedenpinnan alentamisen vaikutusalue

Pohjavedenpinnan alentamisen vaikutusalueen kokoon vaikuttaa kohteen maaperä. Pumppauskaivon ympärille muodostuvan vedenpinnan alentamisen säde eli pumppauksen ulottuvuus R_1 riippuu pumppauksen kestosta t (kaava 19). Weberin mukaan c saa arvon 3, kun t on 3...10 vrk. (Helenelund 1974, s. 81.)

$$R_1 = c \sqrt{\frac{k \cdot H \cdot t}{n}}, \quad (19)$$

missä c on kerroin, joka vaihtelee välillä 1,5...3
 R_1 yhden kaivon pumppauksen ulottuvuus [m].

Ympyrän- tai neliömuotoisen, putkikaivoilla ympäröidyn kaivannon pumppauksen vaikutusalue saadaan Weberin kaavasta (20). (Helenelund 1974, s. 81.)

$$R = \sqrt{R_1^2 + A_1^2}, \quad (20)$$

missä A_1 on kaivojen muodostaman ympyrän säde [m].

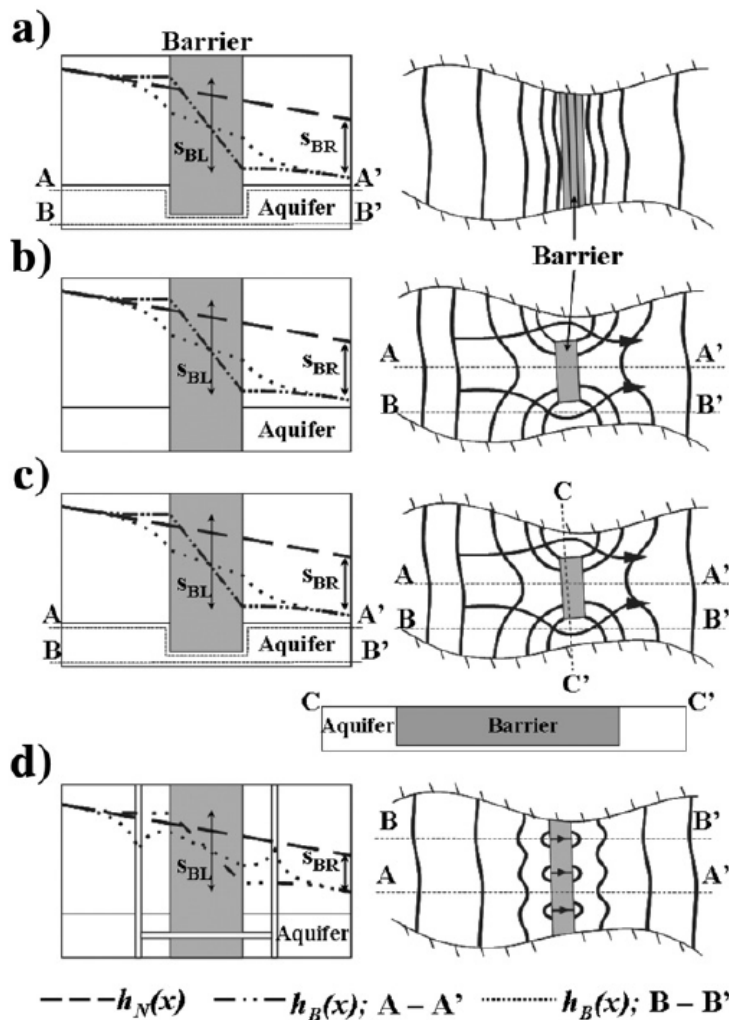
Pohjaveden alentamisen vaikutusalue voidaan arvioida käyttäen apuna Sichardt'n kaavaa (kaava 21). (Helenelund 1974, s. 81.)

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k}, \quad (21)$$

missä s on pohjavedenpinnan alennus [m].

Vettäläpäisemättömät tai huonosti vettäläpäisevät rakenteet voidaan jaotella sen mukaan, millaisen esteen ne pohjaveden virtaukselle muodostavat (kuva 8). Rakenne voi olla (Pujades et al 2012, s. 42–43.)

- huonosti vettäläpäisevä este
- vettäläpäisemätön este, joka ei joko leveys- tai pituussuunnassa täysin estä pohjavedenvirtausta
- vettäläpäisemätön este, joka ei missään suunnassa täysin estä pohjavedenvirtausta
- vettäläpäisemätön este, jossa veden ohivirtaus on järjestetty



Kuva 8. Erilaisia vettäläpäisemättömiä rakenteita: a) huonosti vettäläpäisevä este, b) osittainen este, joka ei leveys- tai pituussuunnassa täysin estä virtausta, c) este, joka ei missään suunnassa täysin estä virtausta ja d) este, jossa veden ohivirtaus on järjestetty. (Pujades et al 2012, s. 43.)

4 Pohjavesivirtauksen numeerinen mallinnus

4.1 Yleistä

Numeerinen mallinnus on suosittu työkalu pohjavesiongelmiin tutkimuksissa. (Spitz & Moreno 1996, s. 1.) Pohjavesiongelmat mallinnetaan tavallisimmin differenssi- tai elementtimenetelmällä. Differenssimenetelmässä mallinnettava alue jaetaan säännölliseen, suorakulmaisen muotoiseen hilapisteverkkoon. Differenssimenetelmä on elementtimenetelmään verrattuna helppotajuisempi ja tarvittavia lähtötietoja on vähemmän. Elementtimenetelmällä puolestaan voidaan paremmin mallintaa epäsäännöllisen muotoisia reuna- ja mallinnusalueen sisäisiä epäjatkuvuuskohtia. (Seppälä & Tuominen 2005, s. 9.)

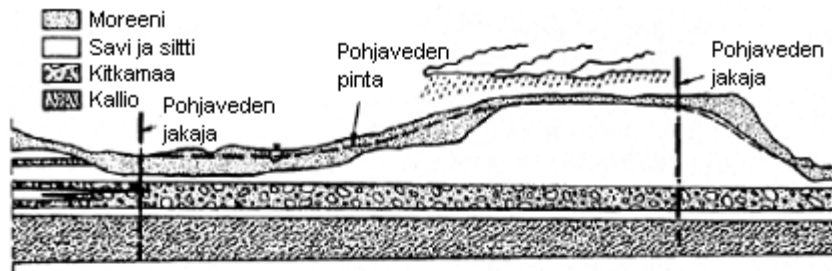
Elementtimenetelmässä käytettävissä on useamman muotoisia elementtejä, kuten kolmionmuotoisia elementtejä. Elementit määritetään kulmissa sijaitsevien solmujen avulla, ja laskelmat suoritetaan näissä solmuissa. Elementin saama arvo määrittyy solmu-kohtien arvoista interpoloimalla (Wang & Anderson 1982, s. 113.) Verkon solmupisteiden määrä vaikuttaa laskennan tarkkuuteen ja ongelman ratkaisemiseen kuluvaan aikaan. Verkon tulisi olla tiheä niissä kohdissa, joissa tapahtuu muutoksia, tai jonka alueella tapahtuvia muutoksia halutaan tarkastella.

4.2 Mallinnuksen vaiheet

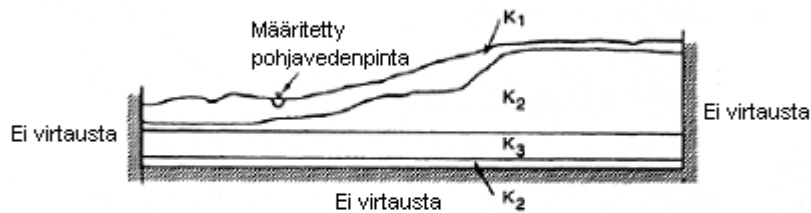
Pohjavesimallinnuksen kulku voidaan jakaa kuvan 9 mukaisiin osiin. Mallinnuksen vaihteita ovat (Spitz & Moreno 1996, s. 18.)

1. lähtötietojen kokoaminen ja tulkinta
2. kohteen luonnonsysteemin ymmärtäminen
3. konseptuaalisen ja numeerisen mallin muodostaminen
4. mallin kalibrointi ja validointi
5. ennusteajot ja tulosten esittäminen.

Luonnonsysteemi



Konseptuaalinen malli



Numeerinen malli



Kalibroitu malli



Kuva 9. Pohjavesimallin muodostamisen vaiheet. (muokattu Spitz & Moreno 1996, s. 20.)

Numeerisella mallinnuksella saatujen tulosten tarkkuus ja laatu riippuvat mallinnusohjelman käyttämästä fysiikasta sekä lähtötietojen määrästä ja laadusta. Yleensä mallinnuksessa tarvittavia parametreja ei saada suoraan kenttä- tai laboratoriomittauksilla, vaan parametrit on johdettava mittaustuloksista. (Spitz & Moreno 1996, s. 18–19.)

Pohjavesimallin muodostamiseen tarvittavia lähtötietoja ovat tutkimusalueesta ja käytettävästä mallinnusohjelmasta riippuen (Seppälä & Tuominen 2005, s. 15.)

- pohjaveden pinnan korkeus
- kalliopinnan korkeus
- vedenläpäisevyysvyöhykkeet (k-arvot)
- maanpinnan korkeus
- imeytymisen määrä (sadanta, haihdunta)
- lähteet (sijainti, virtaama)
- ojitetut alueet (ojien tasot, pohjan johtavuudet)
- vedenottamot (sijainti ja ottomäärät)
- pintavesistöt, jotka ovat yhteydessä akviferiin
- pohjaveden havaintoputket (sijainti ja pinnat)
- muut pohjavesihavaintokohteet
- varastokerroin.

Kun tutkimusalueelta saatavissa oleva tieto on koottu yhteen, voidaan alueesta muodostaa konseptuaalinen malli. Konseptuaalinen malli on idealisoitu tulkinta luonnollisesta tilanteesta, jossa määritetään tutkittavan kohteen maakerrokset ja niiden ominaisuudet sekä alueen reunaehdot. Konseptuaalisen mallin luonti on tärkeä osa mallinnusta, ja tässä vaiheessa tehtyjä virheitä ei voi korjata mallinnuksen myöhemmissä vaiheissa ilman suuria korjauksia. (Spitz & Moreno 1996, s. 19–21.)

4.3 Reunaehdot

Mallin yksikäsitteisen ratkaisun löytämiseksi on mallinnettavan alueen reunoille määritettävä reunaehdot. Reunaehtoien valinnassa ratkaisevaa on, miten mallinnettava alue on rajattu.

Reunaehdot voidaan jakaa kolmeen ryhmään (Aalto 1985, s. 424.)

- tunnettu hydraulinen korkeus
- tunnettu virtaamatiheys
- vapaa vedenpinta.

Tunnetun hydraulisen korkeuden reunaehdossa valittuun kohtaan on määritetty pysyvä pohjavedenpinnan hydraulinen korkeus. Reuna voi olla veteen rajoittuva reuna, jolloin

hydraulinen korkeus on vedenpinnan korkeus. Vaihtoehtoisesti reunalla voidaan käyttää pohjavesiputkesta mitattua pohjavedenpinnan tasoa. (Aalto 1985, s. 425–426.)

Tunnetun virtaamatiheyden reunaehto voidaan käyttää, kun reunalta tuleva tai poistuva virtaama tunnetaan. Jos reuna on vettäläpäisemätön tai sijaitsee vedenjakajan kohdalla, on virtaama nolla. Myös symmetriatasoa voidaan pitää vettäläpäisemättömänä symmetriapuoleen nähden. (Aalto 1985, s. 426–427.)

Vapaan vedenpinnan reunaehdossa reunan vedenpinnalla vallitsee ilmanpaine, jonka korkeusasema tai muoto ei ole tiedossa tai määritelty. Tämän reunan ratkaisu on osa koko mallin ratkaisua. (Aalto 1985, s. 427.)

4.4 Mallin kalibrointi, validointi ja herkkyystarkastelu

Muodostettu pohjavesimalli pyritään saamaan mahdollisimman hyvin todellista tilannetta kuvaavaksi kalibroimalla malli. Kalibroinnissa mallilla simuloituja pohjavesioloja vertaillaan mittaustuloksiin, kuten pohjavedenpinnan korkeuteen ja gradienttiin, pohjaveden virtaussuuntaan ja vesitaseeseen (Seppälä & Tuominen 2005, s. 29). Mallin lähtötietoja muutetaan tietyn vaihteluvälin sisällä, jotta mallin antamat tulokset vastaavat mitattuja arvoja riittävällä tarkkuudella. Mallin kalibroinnin onnistumiseksi on oleellista, että ongelman ratkaisun kannalta merkittävät osatekijät on huomioitu mallin muodostamisvaiheessa. (Spitz & Moreno 1996, s. 21–22.)

Kalibrointi voidaan tehdä manuaalisesti yritys-erehdys-tekniikalla tai tietokoneohjelmalla automaattisesti. Manuaalinen kalibrointi on subjektiivinen ja hidas, ja sitä voidaan käyttää pohjavesiolosuhteiden ollessa yksinkertaisia tai kun mallissa on voitu tehdä paljon yleistyksiä. Automaattista kalibrointia tulee käyttää, kun esimerkiksi testataan erilaisia hypoteeseja tai eri parametrien korrelointia keskenään. Kalibrointi tehdään yleensä steady state eli pysyvän tilanteen tarkasteluna. Jos alueen pohjavesioloissa on suuria vuodenaikaisvaihteluita tai jos ennusteajoissa halutaan tarkastella muutosten nopeutta, on kalibrointi syytä tehdä transient eli muuttuvan tilanteen tarkasteluna. Kalibrointitulokset tulee suhteuttaa mallinnusalueen kokoon ja lähtötietoihin. Jos kalibroidaan mallia, joka kuvaa yli vuoden pituista ajanjaksoa, voidaan kalibroinnin hyväksyttävänä virheenä pitää pohjavedenpinnan vuotuisen vaihtelun suuruutta. (Seppälä & Tuominen 2005, s. 29–36.)

Validoinnilla varmistetaan mallin toimivuus, jotta mallia voidaan käyttää luotettavasti ennusteita tehtäessä. Validoinnissa simuloidaan tilanteita, joista on olemassa sellaista aineistoa, jota ei ole käytetty mallin kalibroinnissa. Validointi on erityisen onnistunut, jos siinä simuloidut tilanteet eroavat merkittävästi kalibroinnissa käytetystä tilanteesta. Jos validoinnissa ei saada riittävän tarkkoja tuloksia, on malli kalibroitava uudelleen validoinnissa käytetyllä aineistolla. (Spitz & Moreno 1996, s. 22.)

Herkkyystarkastelussa pyritään löytämään parametri tai parametrit, jotka vaikuttavat mallilla saatuihin tuloksiin eniten. Herkkyystarkastelu voidaan suorittaa siten, että etsitään kohdetta parhaiten kuvaava parametriyhdistelmä, jonka parametreja poikkeutetaan yksi kerrallaan. (Seppälä & Tuominen 2005, s. 30.)

Kun malli on kalibroitu ja validoitu, voidaan mallilla suorittaa varsinaiset ennusteajot, joissa tutkitaan kiinnostuksen kohteena olevia tilanteita. Tuloksia tarkasteltaessa on arvioitava myös ennusteiden luotettavuutta, mikä voidaan tehdä esimerkiksi vertailemalla mallin herkkyyttä eri parametrien muutoksille. (Seppälä & Tuominen 2005, s. 31.)

4.5 FEM-ohjelma SoilVision SVFlux

Tämän työn mallinnusosio suoritettiin elementtimenetelmään (FEM, finite-element method) perustuvalla SoilVisionin SVFlux -ohjelmalla. Ohjelmalla voidaan mallintaa suotovirtausta ja pohjaveden käyttäytymistä täysin tai osittain vedellä kyllästyneessä maa- ja kallioperässä yksi, kaksi- tai kolmiulotteisesti.

SVFlux käyttää pohjavesivirtauksen osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen FlexPDE-ohjelmaa. FlexPDE muuttaa käyttäjän antaman kuvauksen osittaisdifferentiaaliyhtälösystemistä elementtimalliksi, ratkaisee sen ja esittää tulokset graafisesti. Ohjelma muodostaa kolmioelementtiverkon kaksiulotteisesta ongelmanasettelusta. Elementtiverkon luonti tapahtuu ohjelmassa automaattisesti. (Thode & Gitirana 2012, s. 103.)

Tarkasteltaessa muuttuvan tilan mallia, on SVFlux:ssa määritettävä vedenpidätyskäyrä (SWCC, Soil-water characteristic curve) osittain vedellä kyllästyneelle maaperälle. Vedenpidätyskäyrä voidaan määrittää myös pysyvän tilan mallissa, jos halutaan tutkia tuloksessa tilavuuden ja massan ominaisuuksia. (Thode & Fredlund 2009, s. 342.)

Ohjelmassa on valmiina useita sovitusten menetelmiä vedenpidätyskäyrälle ja vedenläpäisevyydelle. Vedenpidätyskäyrän ja vedenläpäisevyyden käyrän sovittamista varten on määritettävä vedellä kyllästyneen maan tilavuusvesipitoisuus θ_w (VWC, Volumetric water content) (kaava 23). (Thode & Fredlund 2009, s. 342.)

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} \quad (23)$$

missä V_w on veden tilavuus [m^3].

SVFlux-ohjelma muodostaa kolmiulotteiselle virtaukselle kaavan (24) mukaisen yhtälön (Thode & Gitirana 2012, s. 19).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[(k_x + k^{vd}) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(k_y + k^{vd}) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(k_z + k^{vd}) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \\ = -\gamma_w m_2^w \frac{\partial h}{\partial t} , \end{aligned} \quad (24)$$

missä k^{vd} on huokosten vesihöyryn vedenläpäisevyys [m/s]
 m_2^w veden varastoitumisen kerroin.

Kun tarkastellaan pysyvää virtausta vedellä kyllästyneessä maaperässä, eikä huomioida vesihöyryn vaikutusta, voidaan kolmiulotteinen virtaus ilmaista kaavalla (25) (Thode & Gitirana 2012, s. 19).

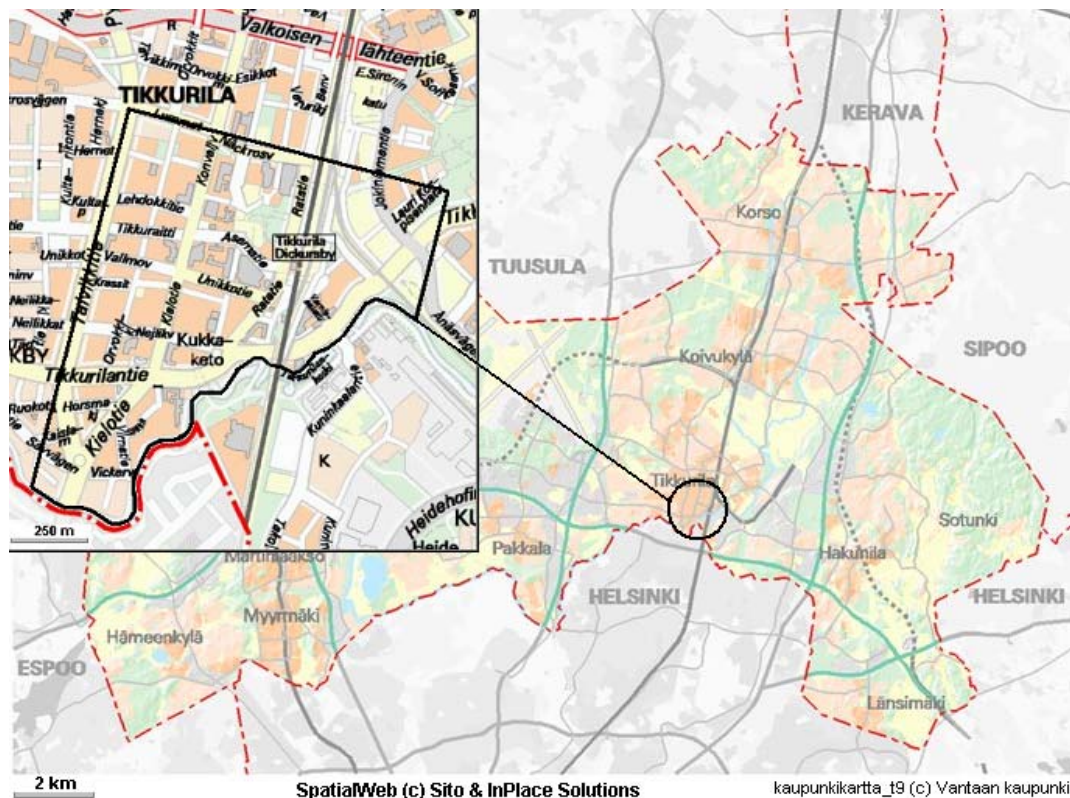
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] = 0 \quad (25)$$

5 Kohteen kuvaus: Tikkurilan keskusta-alue

5.1 Kohteen yleiskuvaus

Tutkimuksen kohteena oli Tikkurilan keskusta-alue Vantaalla, Tikkurilan rautatieaseman länsipuolella. Tarkasteltava alue rajautuu Keravanjokeen etelä-lounaisosassa, Talvikkitiehen lännessä, Lummetiehen pohjoisessa ja kalliomäkeen idässä (kuva 10).

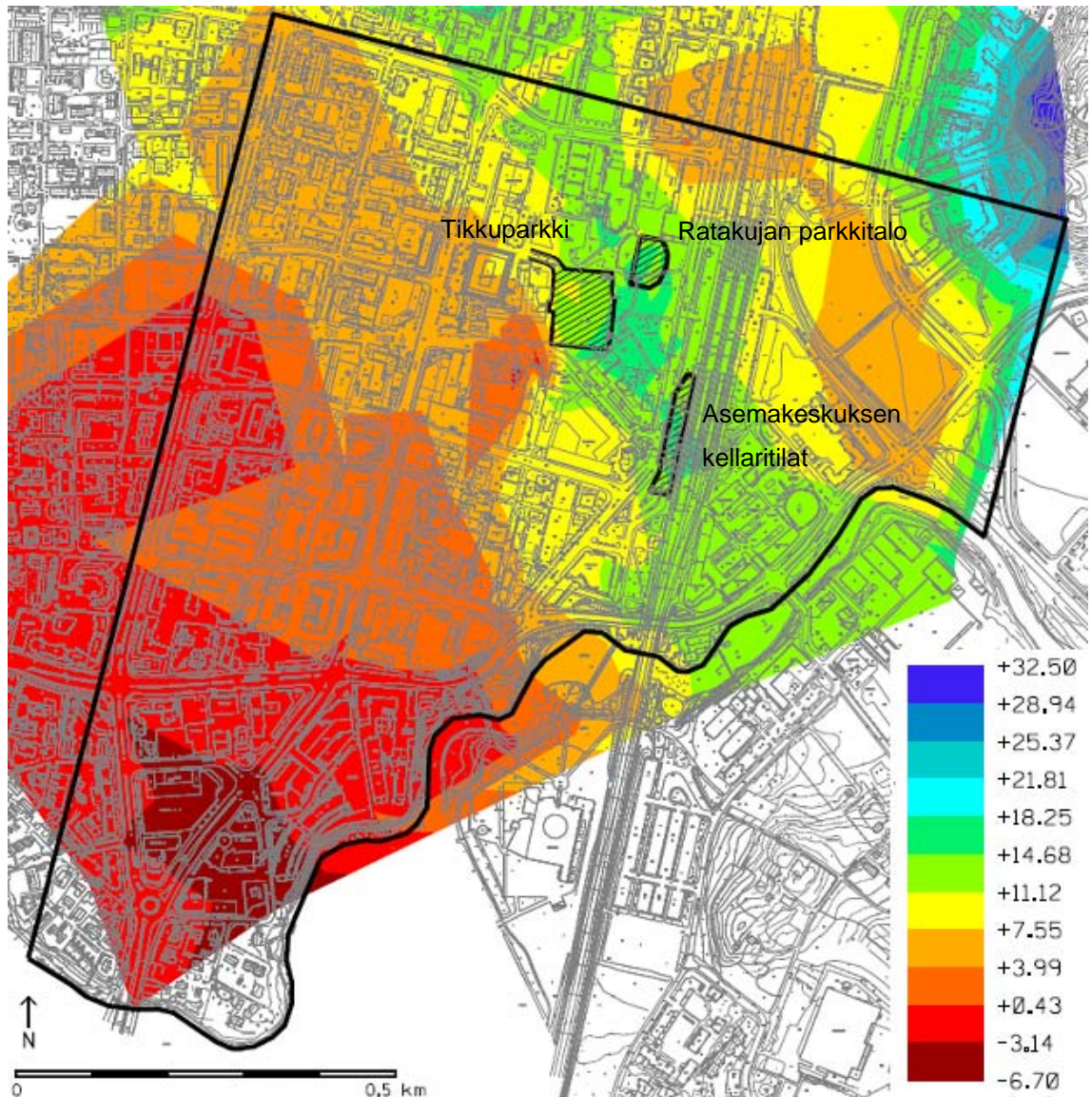
Tikkurilan keskusta-alueella käynnistyi keskustan uudistamisen myötä useita rakennushankkeita, jotka sijoittuvat pääasiassa Asematien pohjoispuolelle ja rautatieaseman länsipuolelle. Uusien rakennusten rakentaminen ei saa alentaa Tikkurilan pohjavedenpinnan tasoa pysyvästi. Alueella on painumille herkkiä kohteita, kuten maanvaraisesti perustettu rautatie, kadut ja osa putkijohdoista, pihat, paikoitusalueet ja osa alueen pientaloista. Lisäksi ainakin osa viemäreistä ja rautatien ajojohtopylväät on perustettu puupaaluille. (Malk & Pajunen 1975, s. 5.)



Kuva 10. Tutkimuskohteen sijainti.

5.2 Kallioperä

Kohteessa suoritettut porakonekairaukset ovat keskittyneet ydinkeskustan alueelle (liite 2), joten kallionpinnan taso voitiin luotettavasti arvioida vain keskusta-alueen osalta. Muuten tutkimusalueella kallionpinnan tasoa on arvioitu muiden kairauksen päättymissyvyyden avulla. Suoritettujen porakonekairauksen perusteella kallio on jyrkkäpiirteistä, ja kallionpinnan taso vaihtelee välillä +9,4...+16,2. Korkeimmillaan kallio on tutkimusalueen koillispuolella, jossa kallio on paljastuneena noin tasovälillä +25...+30 (kuva 11). Kallionpinta laskee kohti lounasta, jossa kallionpinta on alimmillaan korkeustasolla -5...+2.



Kuva 11. Kallionpinnan arvioitu korkeustaso tutkimusalueella.

Tikkurilan ydinkeskustan alueella on yhtenäinen kalliokynnys, joka ulottuu kaakko-luodesuuntaisena Keravanjoelta tutkimusalueen pohjoispuolelle. Kalliopaljastuman ja kalliokynnyksen välillä kallionpinta laskee oletettavasti tasovälille +2...+6.

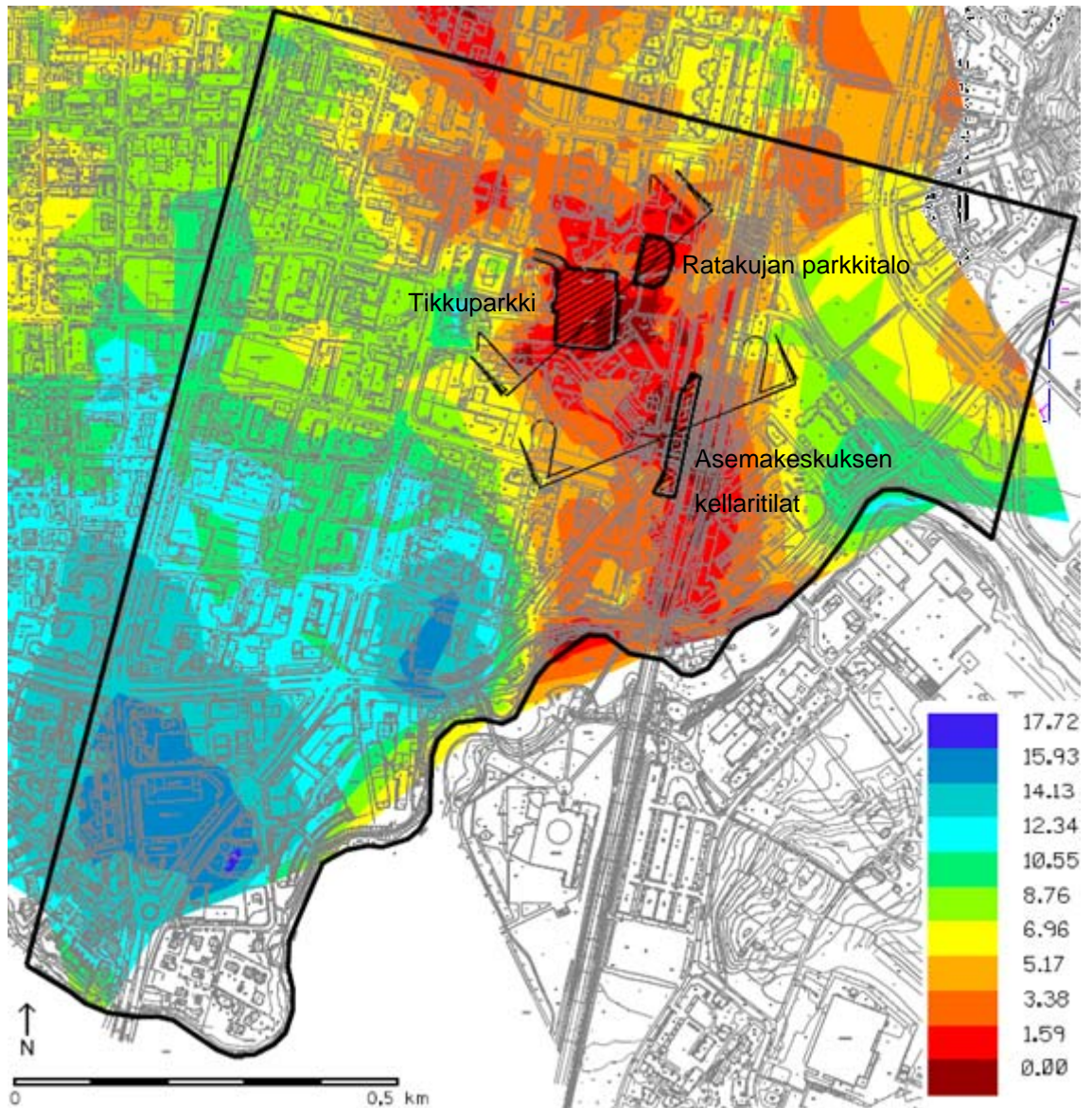
Ydinkeskustan alueelta otettujen kalliokairanäytteiden ja suoritettujen vesimenekkimittausten mukaan kallio on laadultaan pääasiassa kiinteää, osittain seosrakenteista ja val-litsevan mineraalikoostumuksen perusteella haurasta. Kallio on rikkonaista kallion pin-taossa noin 1...5 m matkalla. (Tuisku & Määttä 1992a, s. 7).

5.3 Maaperä

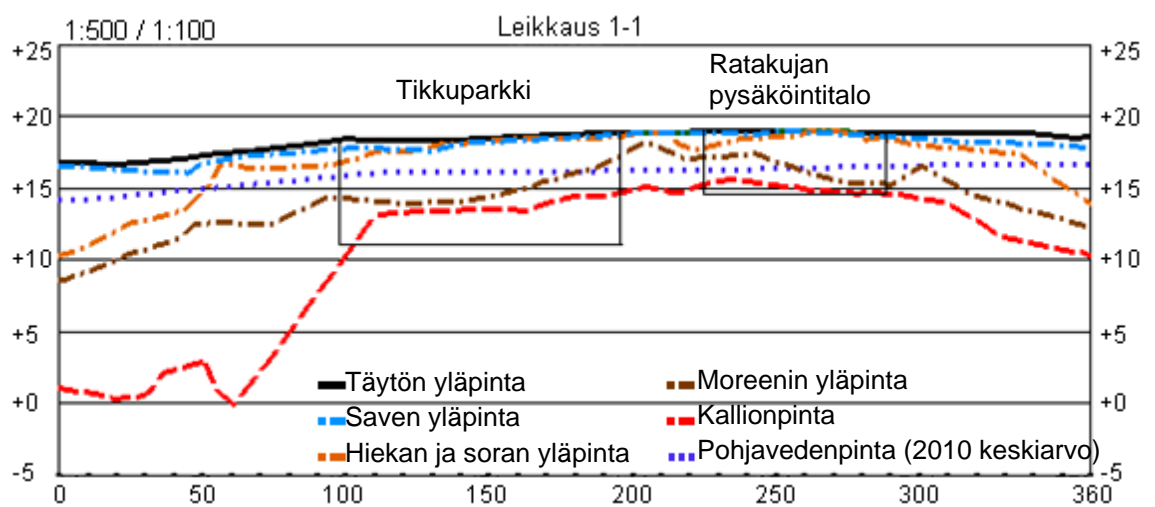
Kohteessa maanpinnan taso vaihtelee pääasiassa välillä +15...+20 ja laskee kohti lou-nasta. Maanpinta on korkeimmillaan tasolla +25...+30 alueen koillispuolella sijaitsevan kalliopaljastuman alueella.

Tikkurilan luonnollinen maaperä on pääasiassa savea. Savikerrokset ovat paksuimmil-laan tutkimuskohteen lounaisosassa, jossa savikerroksen paksuus on noin 10...20 m. Ydinkeskustan alueella savikerros on ohuempi kuin muualla alueella ja puuttuu paikoin kokonaan (kuvat 12–14). Savikerroksessa on yleisesti noin 0,5...1,0 m paksu kuiva-kuorikerros. Saven päällä on monin paikoin täytemaakerros, jonka paksuus on noin 0,5...2,0 m.

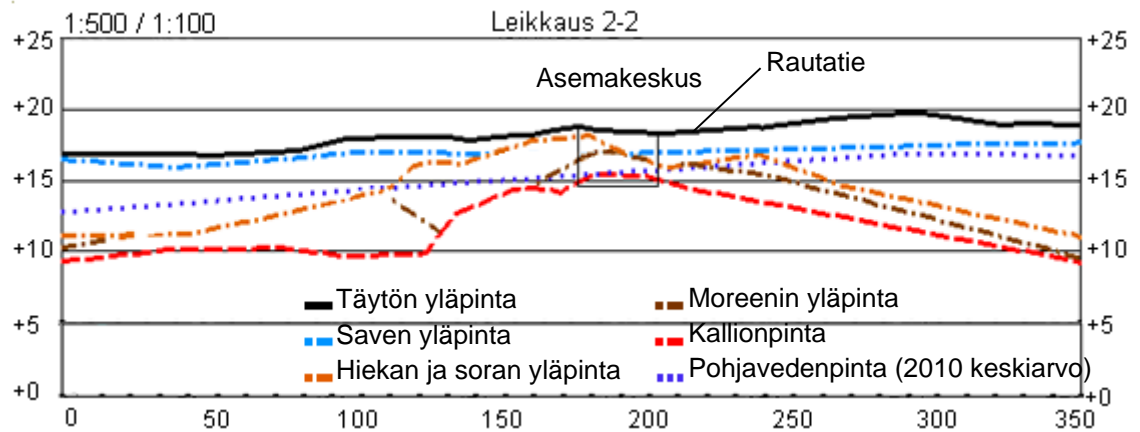
Savikerrosten alla on tiivistä pohjamoreenia, jonka päällä on löyhempiä sora- ja hiekka-kerroksia. Paikoin alueella on myös saven päälle muodostuneita hiekkakerroksia sekä savikerroksen sisällä ohuita silttisiä välikerroksia. (Lehtinen 1990, s. 5).



Kuva 12. Savikerroksen paksuus ja leikkausten sijainti.



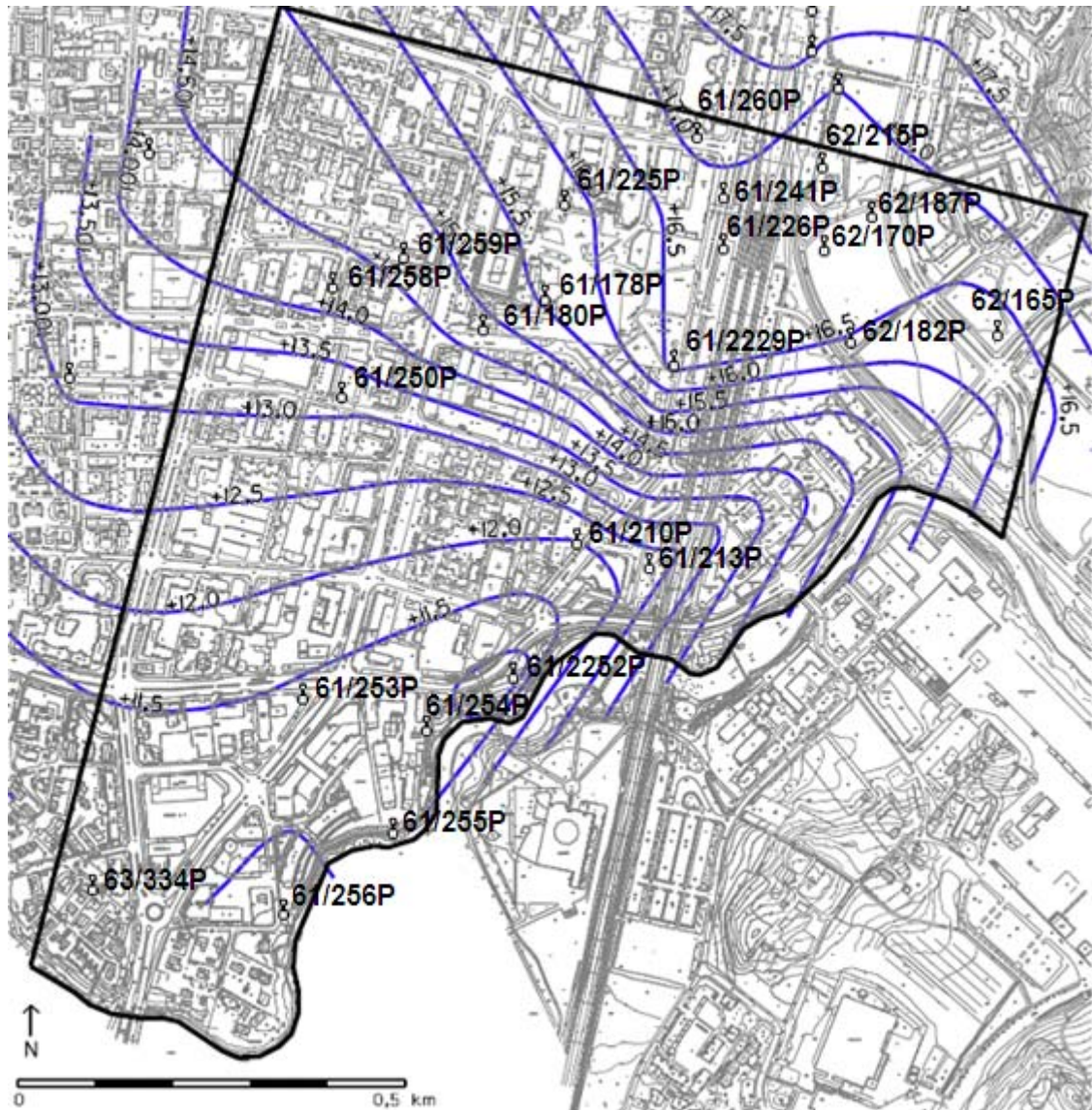
Kuva 13. Leikkaus 1-1.



Kuva 14. Leikkaus 2-2.

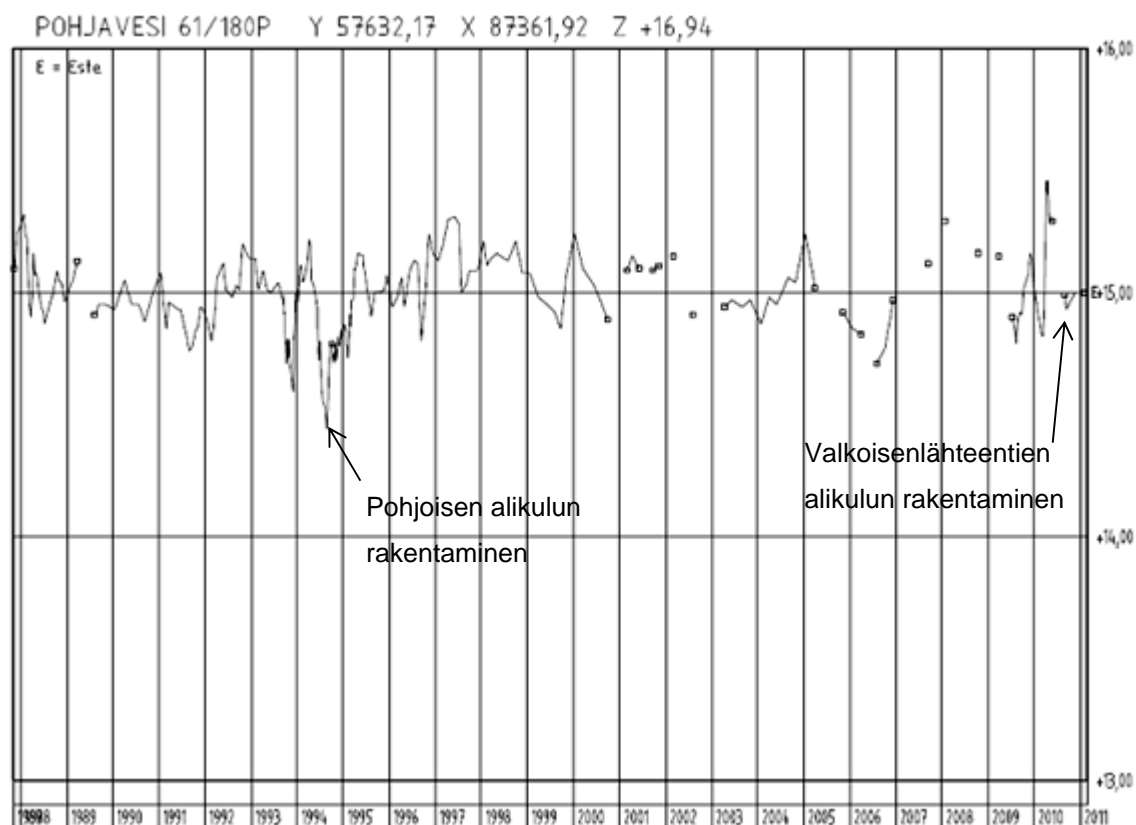
5.4 Pohjavesiolosuhteet

Tarkasteltavalla alueella pohjavedenpinnan taso vaihtelee välillä +11,0...+18,0. Pohjavesi on korkeimmillaan alueen koillisosassa ja alimmillaan Keravanjoen tuntumassa. Kuvassa 15 on esitetty syksyn 2010 pohjavesihavaintojen mukaan piirretty pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrästä. Pohjavesihavaintojen perusteella tutkimuskohteessa pohjaveden päävirtaussuunta on koillisesta lounaaseen. Varsinainen pohjavesi virtaa savikerrosten alla hyvin vettä johtavissa kitkamaakerroksissa. Paikoin savikerroksen yläpuoliseen täytemaahan on muodostunut orsivettä.



Kuva 15. Syksyllä 2010 pohjavedenhavaintoputkista mitattujen pohjavedenpinnan korkeuksien perusteella piirretty pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrästä tutkimusalueella ja vuonna 2010 toiminnassa olleet pohjavesiputket.

Pohjavedenpinnan vuotuinen vaihtelu on ollut pohjaveden havaintoputkista tehdyissä mittauksissa noin metrin luokkaa. Kuvassa 16 on esitetty pohjavedenpinnan vaihtelu vuosien 1989 ja 2011 välillä pohjaveden havaintoputkessa 61/180P. Havaintoputkesta tehdyissä mittauksissa on havaittavissa läheisten alikulkujen rakennustöiden vaikutus pohjavedenpintaan.



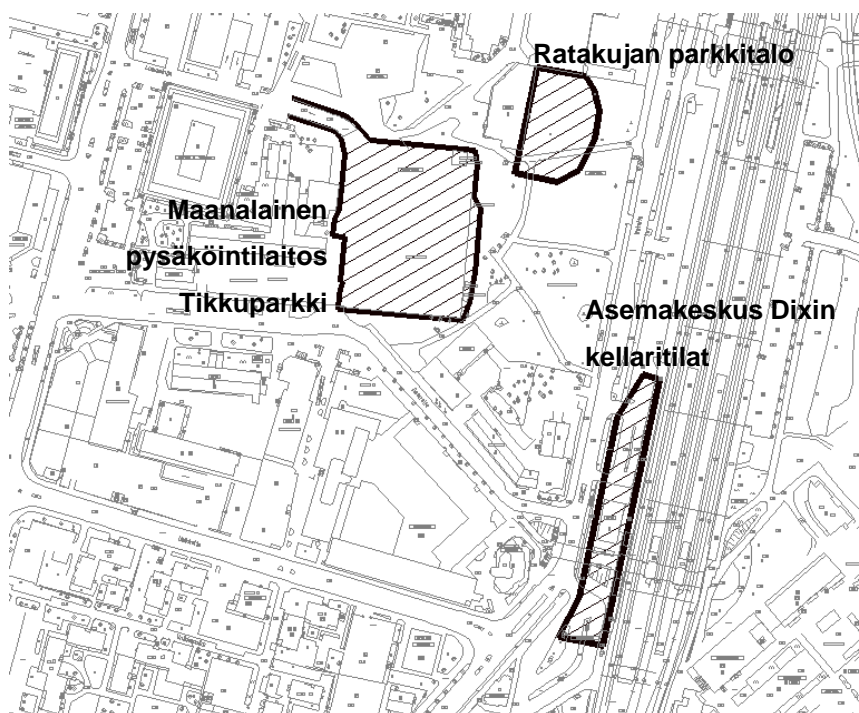
Kuva 16. Pohjavedenpinnan vaihtelu pohjaveden havaintoputkessa 61/180P.

5.5 Kohteessa sijaitsevat maanalaiset tilat ja pumppaamot

5.5.1 Uudet maanalaiset tilat

Tikkurilan keskusta-alueelle rakentuvia maanalaisia tiloja sisältäviä rakennuksia ovat maanalainen pysäköintilaitos Tikkuparkki, Ratakujan pysäköintitalo ja uusi asemakeskus Dixi (kuva 17). Tikkuparkin rakentaminen aloitettiin vuonna 2011, ja sen maanalainen osa valmistui vuoden 2012 aikana. Asemakeskus Dixin ja Ratakujan pysäköintitalon rakentaminen on alkanut vuonna 2012.

Uusien rakennusten rakentaminen ei saa alentaa Tikkurilan pohjavedenpinnan tasoa pysyvästi, joten rakennusten kuivatustaso on sijoitettava pysyvän pohjavedenpinnan yläpuolelle tai pysyvän pohjavedenpinnan alle sijoittuvien kuivatusrakenteiden vaikutus ympäristöön on estettävä esimerkiksi patoseinällä tai korvaavan pohjaveden syötöllä. Suunnittelussa tulee myös huomioida pohjaveden virtaus rakennuksen ympäri.



Kuva 17. Tikkurilan keskusta-alueelle rakentuvat uudet maanalaiset tilat.

Maanalainen pysäköintilaitos Tikkuparkki sijoittuu suurimmalta osalta uuden torialueen alle, ja sen alempi pysäköintikerros on tasolla +11,0 ja ylempi kerros tasolla +14,0. Rakennus ulotetaan pysyvässä tilanteessa vesipainerakenteisena kallioon saakka. Rakennuksen lounaisosalla, jossa kallio on syvemmillä, seinä perustetaan anturalla kallioon ulottuvan suihkuinjektointiseinän varaan. Rakennuksen ulkopuolelle asennetaan noin tasolle + 15 salaojaputkisto, jolla pohjaveden pinnan taso pidetään samana rakennuksen eri puolilla. Lisäksi rakennuksen ulkoseinien viereen tehdään täyttökerrokset hyvin vettä johtavasta materiaalista. (Rahikainen & Vehmas 2011, s. 1–3.)

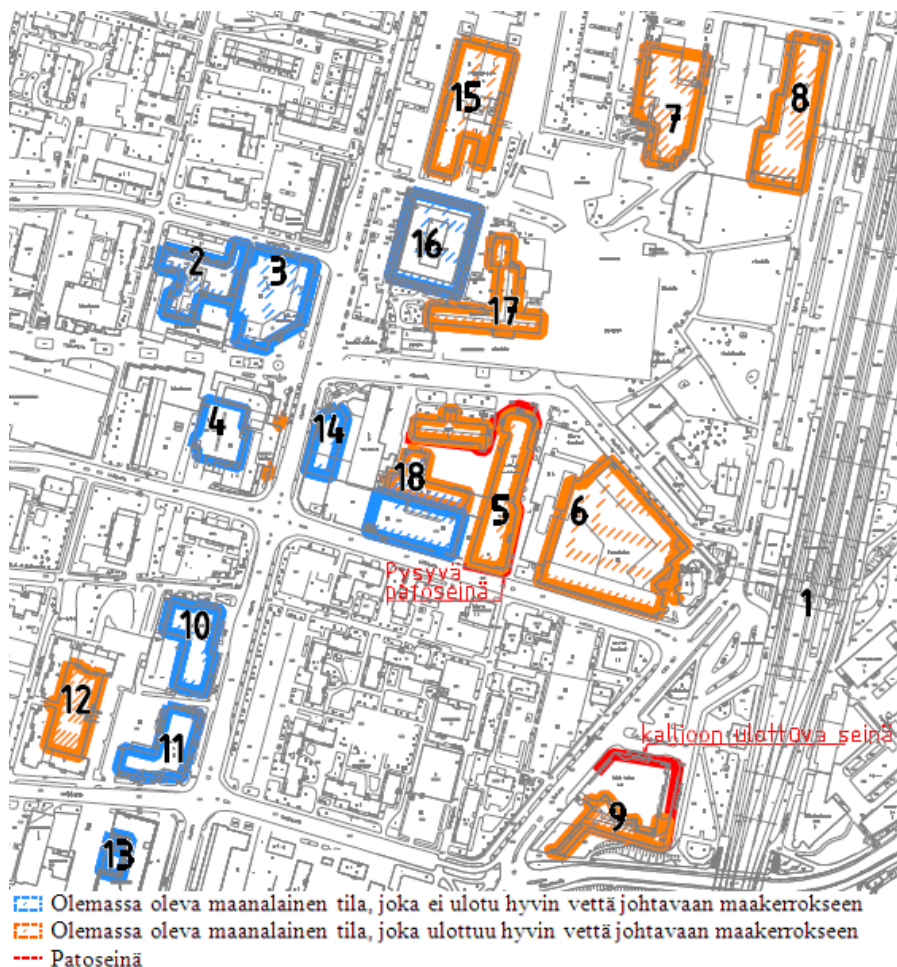
Ratakujan pysäköintitalossa on neljä pysäköintikerrosta, ja rakennuksen alin kellarikerros on noin tasolla +14,5. Maanpinta pysäköintitalon alueella vaihtelee välillä +18,7...+19,3. Kellarin ulkoseinä rakennetaan pohjavedenpinnan alapuolella vesipainerakenteisena kallioon saakka. Olemassa olevien rakennusten lähellä työnaikaiset teräsponttiseinät jäävät pysyviksi rakenteiksi, ja vesipaineseinät valetaan teräsponttiseinänä. Vesitiiviiden seinien ja kallion välisen kontaktin vesitiiviyyttä parannetaan injektioimalla. Kallioon ulottuva perusmuuri verhoinjektoidaan viisi metriä alle perustamistason. Pohjaveden virtausta rakennuksen ympäri parannetaan pysyvän patoseinän ja ponttiseinän väliin tehtävällä hyvin vettä johtavalla murske- tai sepelitäytöllä. Täyttö

tehdään rakennuksen itä- ja eteläreunalla. Tarvittaessa pohjaveden virtausta parannetaan täyttökerrokseen asennettavilla salaojaputkilla. (Rahikainen & Kärki 2012, s. 2–4.)

Olemassa olevassa asemarakennuksessa oli maanalainen asetinlaitetila tasolla +15,7, jonka ympärille rakentuvat uuden asemakeskuksen kellaritilat tasovälille +14,6...+15,5. Kellaritilojen alueella maanpinta on noin tasovälillä +18,8...+19,2, ja kalliopinta vaihtelee tasovälillä +13...+16. Kellarin rakenteet tehdään vesitiiviinä rakenteina pohjavedenpinnan alapuolella, ja pysyvä salaojitus on tasolla +17,0. Kallion ja seinän kontakti sekä kallio kellarin alla tiivistetään injektoimalla. Ratapihan puolelle asennetaan kitkamaakerrokseen ulottuvia imeytyskaivoja, joihin syötetään kaivantoon tulevia vesiä, jos ympäristön pohjavedenpinta alkaa laskea. (Palmu & Ärmänen 2012, s. 2–4.)

5.5.2 Olemassa olevat maanalaiset tilat

Tikkurilassa on ennestään useita rakennusten yhteydessä olevia maanalaisia tiloja ja rakenteita, joista tässä työssä huomioitua on koottu kuvaan 18 sekä taulukkoon 2.



Kuva 18. Tutkimusalueella sijaitsevat olemassa olevat maanalaiset tilat.

Taulukko 2. Tutkimusalueella sijaitsevat maanalaiset tilat ja niiden alin lattiataso

| Olemassa olevat maanalaiset tilat | Alin lattiataso |
|---|------------------------|
| 1 Tikkurilan asema | + 14.4 |
| 2 Asuin- ja liikerakennus | + 14.0 |
| 3 Elannon tavaratalo | + 14.3 |
| 4 Vantaan säästötalo | + 14.1 |
| 5 Kiinteistö oy Bethania & LP-alue, Unikkotie | + 14.0 |
| 6 Tikkurilan kauppakeskus Tikkuri | + 14.3 |
| 7 Kirjasto | + 16.5 |
| 8 Laurea | + 15.2 |
| 9 Hotelli Vantaa | + 11.4 |
| 10 Kiinteistö oy Krassipuisto | + 13.6 |
| 11 Liikerakennus | + 14.2 |
| 12 Paikoitus | |
| 13 Paikoitus | + 14.4 |
| 14 Tikkurilan terveysasema | + 15.0 |
| 15 Maistraatti | + 16.2 |
| 16 Virastotalo | + 15.8 |
| 17 Kaupungintalo | + 15.5 |
| 18 Seurakunnat, virastotalo | + 15.0 |

Pääosa Tikkurilan rakennuskannasta on rakennettu 70–80 -luvulla, jolloin rakennusten pohjavettä alentavaa vaikutusta ei ole otettu huomioon. Suurin osa kellaritiloilla varustetuista rakennuksista kuitenkin sijoittuu savikolle, ja rakennusten kohdalla savikerros ulottuu syvemmälle kuin rakennusten kuivatustaso.

Osa keskusta-alueen rakennusten ja rakenteiden alimmista lattiatasoista ulottuu osittain tai kokonaan hyvin vettä johtaviin maakerroksiin. Maanalaisten tilojen kuivatuksen seurauksena varsinaisen pohjaveden pinta voi laskea. Kun rakennuksen pohja ulottuu vettä johtavaan kerrokseen, voi vettä johtavan kerroksen tilavuus vähentyä ja sitä kautta maakerroksen vedenjohtokyky pienentyä. Lisäksi niillä kohdin, joissa savikerros puuttuu kokonaan, vähentävät rakennus ja sitä ympäröivät päällystetyt pinnat veden imeytymistä maaperään.

Joidenkin rakennuksen salaojituksen pohjavettä alentavaa vaikutusta ympäristöön on pyritty vähentämään rakentamalla perusmuurien ulkopuolelle pysyvä patoseinä. Tällainen on esimerkiksi kuvan 18 kohteessa numero 5, jossa rakennuksen kuivatustaso ulottuu hyvin vettä johtavaan maakerrokseen. Patoseinän alapää on ulotettu huonosti vettä läpäisevään maakerrokseen. Kohdissa, joissa savikerros on ohut tai se puuttuu kokonaan, on patoseinän alapään ja kallionpinnan välistä maa-aineista on tiivistetty injektoinnilla. Injektoinnin jälkeen patoseinän alitse suotautuvan veden määräksi on mitattu 130 l/h eli 3,1 m³/vrk, jota on pidetty hyväksyttävänä määränä. (Ampuja & Lehtinen 1990, s. 1.)

5.5.3 Pumppaamot

Alueella sijaitsevista sadevesipumppaamoista tiedossa on Tikkurilan aseman alikulun sadevesipumppaamo, josta pumpataan vuoden 1988 selvityksen mukaan 19,0 m³/vrk (Tuisku & Määttä 1992b, s. 4). Alikulun alin taso on tasolla +14,2 (Lehtinen 1990, s. 39).

Muita tutkimusalueella olevia pumppaamoja ovat työaikaisiin kaivantoihin liittyvät pumppaamot, joilla kaivannoista pumpataan vettä pois. Lisäksi oletettavasti alueella on rakennusten kuivatukseen liittyviä pumppaamoja.

5.6 Kohteessa ja sen ympäristössä suoritettuja tutkimuksia

Tikkurilan alueelta on jonkin verran tutkimuksia ja selvityksiä alueen pohjavesiolloista. Tikkurilan suuralueen pohjavesiolosuhteita on selvitetty pro gradu -tutkielmassa *Rakentamisen vaikutus pohjavesioloihin Tikkurilan suuralueella* (Lehtinen 1990). Valkoisenlähteentien alikulun rakentamisen vaikutuksia pohjaveteen on tutkittu aiheesta tehdyssä diplomityössä *Pohjavesitilanteen tarkastelu alikulkusiltapaikoilla* (Martio 2011). Valkoisenlähteentien alikulusta on laadittu myös 3D-pohjavesimalli (Arkima & Niemi 2007). Valkoisenlähteentien alikulusta tehdyissä laskelmissa käytetyt vedenläpäisevyyskertoimet on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyjä vedenläpäisevyyskertoimen arvoja

| Maakerros | Vedenläpäisevyyskerroin k [m/s] | | |
|--------------------|-----------------------------------|---|---|
| | Martio 2011 | Sito 2007 | Ins.toimisto Pohjatekniikka 1992 |
| Täyte | $1,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ |
| Savi | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-9}$ |
| Hiekka | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | $1,0 \cdot 10^{-4}$ |
| siHk | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | |
| HkMr | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$, $4,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ |
| Rikkonainen kallio | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-12}$ | $1,0 \cdot 10^{-7}$, $1,0 \cdot 10^{-8}$ (injektoitu kallio) |

90-luvulla on tutkittu kallioperän laatua ja rakennetta Tikkurilan keskusta-alueella, ja tutkimusten yhteydessä suoritettiin vesimenekikokeita kallion vedenläpäisevyyden selvittämiseksi. Vesimenekikokeiden perusteella määritetyt kallioperän vedenläpäisevyyskertoimet on esitetty taulukossa 4. Tutkimusten ohessa arvioitiin alueelle sijoittuvan kalliorakentamisen vaikutuksia pohjaveteen. Laskelmissa kalliolle käytettiin vedenläpäisevyysarvoa $k = 10^{-7}$ m/s ja injektoidulle vyöhykkeelle $k = 10^{-8}$ m/s (taulukko 3). Laskennan perusteella kalliorakentamisen huomattava vaikutusalue rajoittuisi noin 60...80 m:n etäisyydelle rakennettavasta kohteesta. Pohjavedenpinta laskisi 3,0 m noin 20 m etäisyydellä ja 0,5 m noin 60 m etäisyydellä kohteesta. Rakentamisen vaikutus pohjavedenpinnan tasoon ulottuisi laskelmien mukaan noin 120...160 m etäisyydelle. (Tuisku & Määttä 1992b, s. 5–6.)

Taulukko 4. Kallioperälle määritettyjä vedenläpäisevyyskertoimen arvoja (Tuisku & Määttä 1992b)

| Kallion laatu ja sijainti | Lugeon-arvo | | Vedenläpäisevyys k [m/s] | |
|---------------------------|-------------|------|----------------------------|----------|
| | min | max | min | max |
| Rikkonainen pintaosa | 13,6 | 15,8 | 1,77E-06 | 2,05E-06 |
| Runsasrakoinen osuus | 3,8 | 9,3 | 4,94E-07 | 1,21E-06 |
| Vähärakoiset tiiviit osat | 0,02 | 1,8 | 2,60E-09 | 2,34E-07 |

Hakoniemi ja Mäki-Torkko Pöyry Finland Oy:stä (2013) ovat laatineet pohjavesimallin Tikkurilan ja Hiekkaharjun alueelta Visual Modflow ja Processing Modflow -ohjelmistoilla. Pohjavesimalli koostui viidestä maakerroksesta, ja mallissa käytetty solukoko oli 10 metriä. Virtausmallilla simuloitiin Tikkuparkin, asemakeskus Dixin kellaritilojen ja Ratakujan pysäköintitalon alimman kerroksen vaikutusta pohjavedenpinnan tasoon tai painetasoon, kun rakennusten vesitiiviit rakenteet ulottuvat kallionpintaan saakka. Mallilla tarkasteltiin myös, ehkäiseekö rakennusten ympärille sijoitetut salaojat rakennusten aiheuttamaa pohjavedenpinnan tason muutosta. Salaojat mallinnettiin 10 x 10 m solukoolla niin, että rakennuksia ympäröiville soluille annettiin vedenläpäisevyyskertoimeksi 50 m/d eli $5,8 \times 10^{-4}$ m/s. (Hakoniemi & Mäki-Torkko 2013, s. 6, 9–10.)

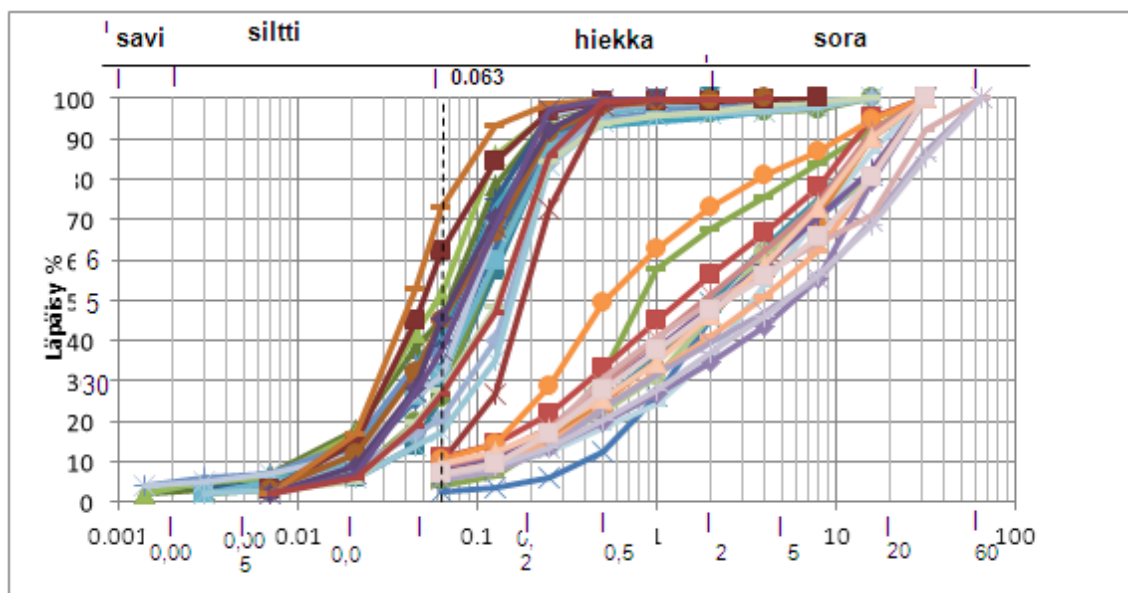
Pöyryn suorittaman mallinnuksen perusteella uudet maanalaiset tilat padottavat pohjavettä siten, että pohjavesi laskee rakennusten etelä-lounaispuolella ja nousee vastakkaisella puolella. Pohjaveden painetaso laskee rakennusten välittömässä läheisyydessä useita kymmeniä senttimetrejä ja pohjavedenpinnan lasku 200 metrin etäisyydellä vielä 0,15 metriä. Simulaatioiden perusteella salaojakerroksen vaikutuksesta pohjaveden painetaso rakennusten etelä-länsipuolella nousee ja itä-pohjoispuolella laskee, jolloin vaikutus on vastakkainen rakennusten padottavaan vaikutukseen verrattuna. (Hakoniemi & Mäki-Torkko 2013, s. 10.)

6 Kohteen pohjavesivirtauksen mallintaminen

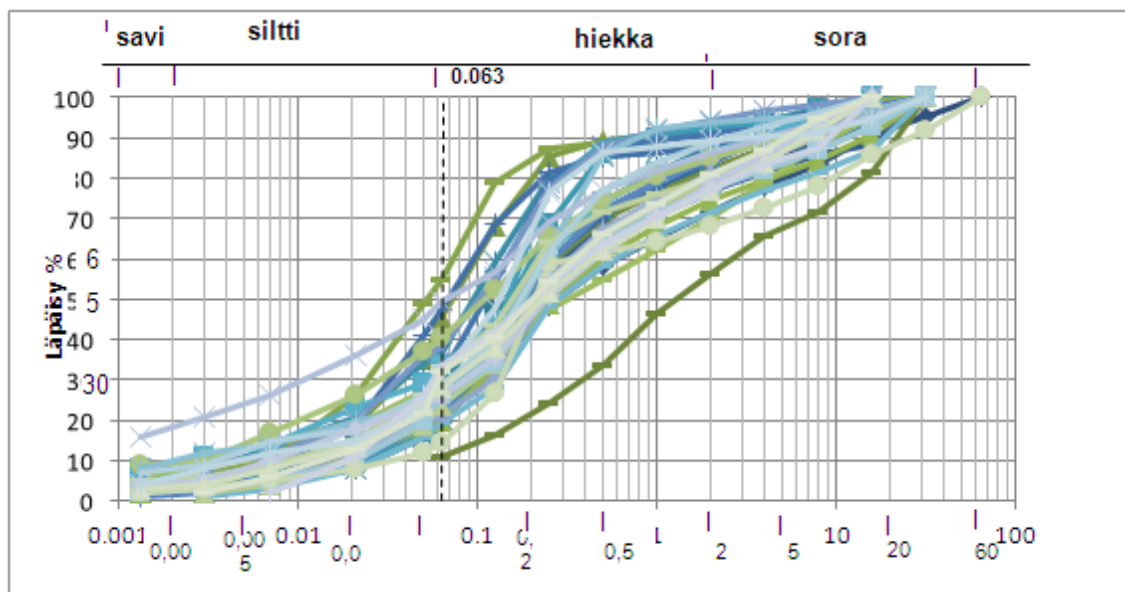
6.1 Laskentaparametrien määrittäminen

Tässä työssä mallinnus tehtiin steady state eli pysyvän tilan mallinnuksena. Pysyvän tilan mallia käytettiin, koska tarkoituksena oli tarkastella uusien maanalaisten tilojen pysyvää vaikutusta pohjavedenpintaan. Pysyvän tilan mallin etuna on, että lähtötietoja tarvitaan vähemmän kuin muuttuvan tilan mallissa. SoilVisionissa pysyvän tilan mallissa riittää, että kerroksille määritetään vedenläpäisevyyskertoimet ja tilavuusvesipitoisuudet.

Mallissa käytetyt vedenläpäisevyyskertoimet määritettiin kohteesta otettujen häiriintyneiden maanäytteiden raejakaumien perusteella. Tutkittaviksi raejakaumiksi valittiin sellaiset maanäytteet, jotka olivat moreenia, hiekkaa tai soraa. Kuvassa 19 on esitetty raejakaumat näytteistä, jotka luokiteltiin kuuluvan hiekka- ja sorakerrokseen, ja kuvassa 20 on esitetty raejakaumat näytteistä, jotka luokiteltiin kuuluvan moreenikerrokseen.



Kuva 19. Hiekka- ja sorakerroksesta otettujen maanäytteiden raejakaumat.



Kuva 20. Moreenikerroksesta otettujen maanäytteiden raejakaumat.

Raejakaumista määritettiin tehokas raekoko d_{10} , jonka avulla laskettiin näytteille vedenläpäisevyyskertoimet kaavalla (14). Pohjaveden lämpötilana käytettiin lämpötilaa $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eri maakerroksille määritetyt vedenläpäisevyyskertoimet on koottu taulukkoon 5. Tarkemmat tiedot näytteistä on liitteessä 3.

Taulukko 5. Maanäytteiden raejakaumien perusteella määritetyt maakerrosten vedenläpäisevyyskertoimet

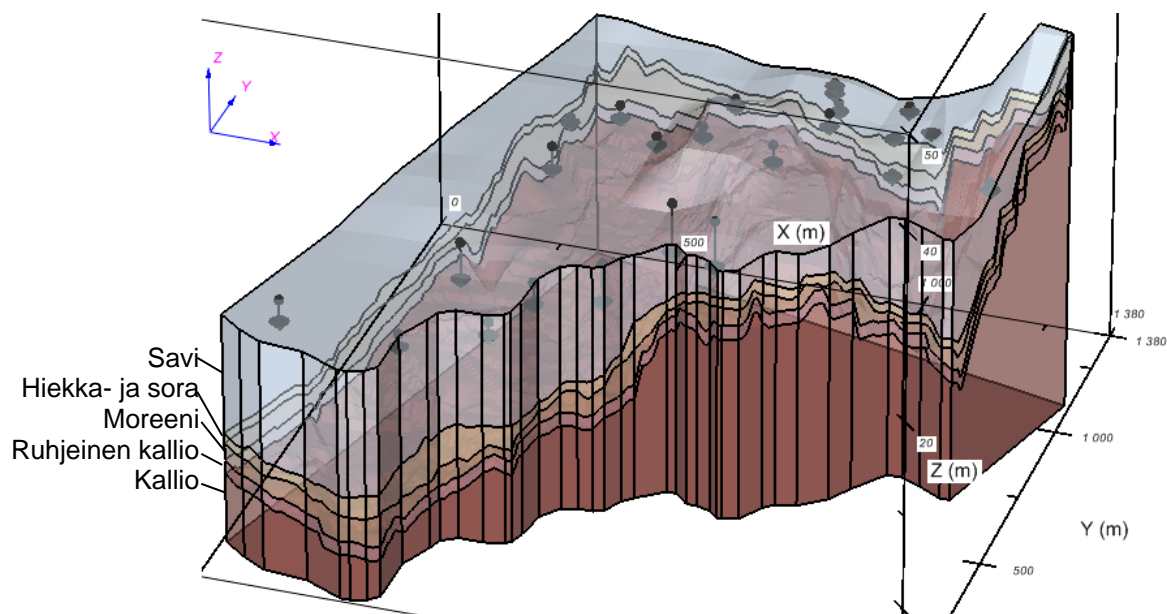
| Maalaji | Näytteiden määrä | Vedenläpäisevyyskerroin [m/s] | | |
|----------------|------------------|-------------------------------|-------------|-------------|
| | | keskiarvo | minimi | maksimi |
| Hiekka ja sora | 37 | 6.55471E-05 | 6.17935E-07 | 0.00086921 |
| Moreeni | 41 | 3.47461E-06 | 1.32E-09 | 7.31631E-05 |

6.2 Mallinnuksen suorittaminen

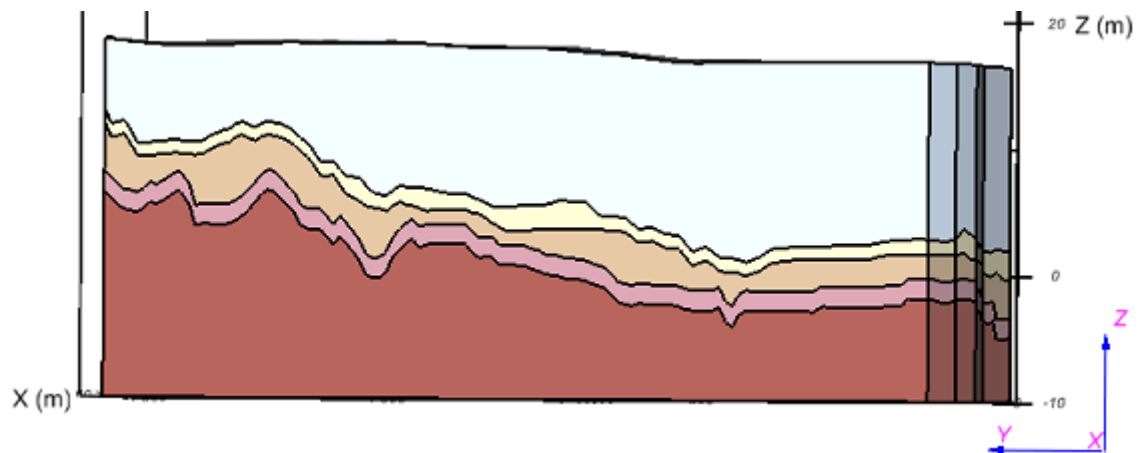
Kolmiulotteinen pohjavesimalli muodostettiin rajaamalla mallinnusalue ja määrittämällä maakerrosten rajat pintoina. Mallinnusalue on koordinaattien $x=57040$, $y=86410$ ja $x=58420$, $y=87790$ rajaama alue. Mallinnusta varten origoksi asetettiin piste $x=57040$, $y=86410$, jonka avulla alueen kairauspisteiden koordinaatit siirrettiin välille $x=[0;1380]$ ja $y=[0;1380]$.

Kallionpinta muodostettiin porakonekairauksista saaduista varmoista kalliopinnan korkeustasoista sekä kevyiden kairausten päättymistason perusteella arvioituista kalliopinnan korkeustasoista. Korkeustasot tuotiin SoilVisioniin hajapisteinä, joista ohjelmalla interpoloitiin kalliopinnan korkeus 10m x 10m ruudukkona. Kalliopinnan korkeuspisteistä oli ennen ohjelmaan tuontia harvennettu alle 10 m toisistaan olevat pisteet.

Kalliopinnan ruhjeinen pintaosa mallinnettiin kopioimalla luotu kalliopinta toiseksi pinnaksi, jonka korkeustaso oli 1,5 metriä alempana kuin alkuperäinen kalliopinta. Kalliopinnan päälle muodostettiin maakerrosten rajapinnat samaan tapaan kuin kalliopinta oli tehty. Muodostetut maakerrokset olivat tiivis moreenikerros, löyhempi hieka- ja sorakerros sekä savikerros (kuvat 21–22). Hiekka- ja sorakerros mallinnettiin yhtenäisenä kerroksena mallin yksinkertaistamiseksi. Toinen peruste maakerrosten yhdistämiselle oli se, että soraa esiintyy kohteessa sen verran vähän, ettei se muodosta yhtenäistä maakerrosta. Koska tutkimusalueella kalliopinta on paikoin paljastuneena, oli maakerroksia nostettava noudattamaan kalliopinnan muotoa sellaisilla kohdilla, joissa muodostettu maakerroksen pintamalli olisi muuten kulkenut syvemmällä kuin kalliopinta.



Kuva 21. Muodostettu kolmiulotteinen rakennemalli. Kuvaa on skaalattu z-suunnassa 20-kertaiseksi.



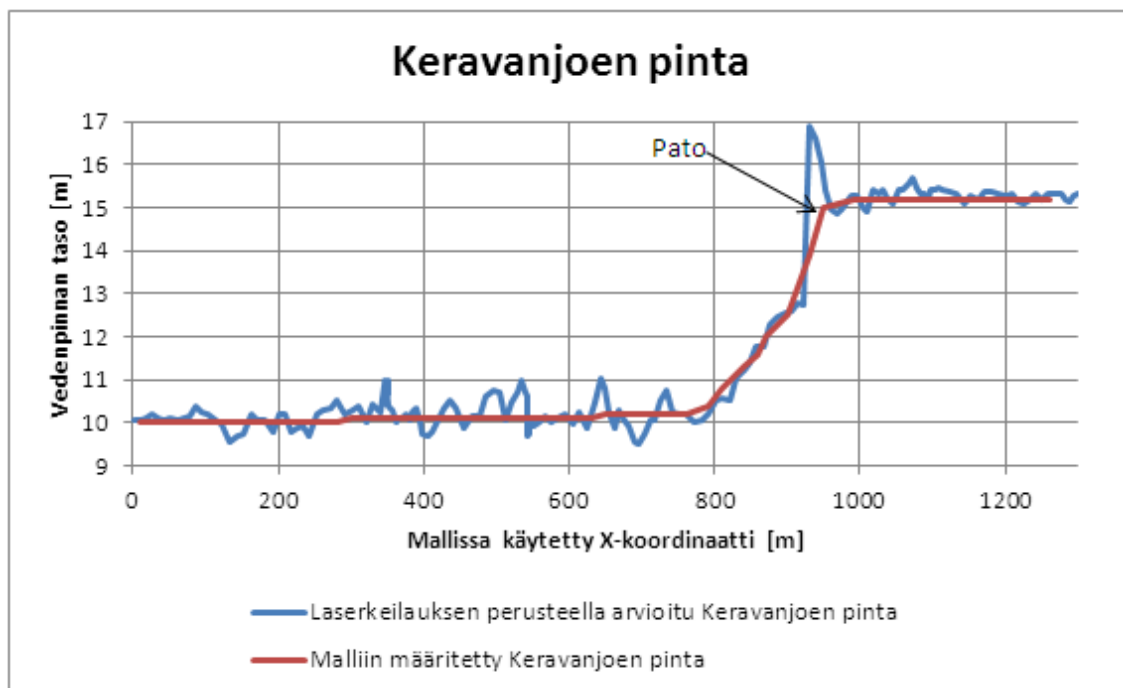
Kuva 22. Projektio muodostetusta mallista alueen länsireunalta.

6.3 Reunaehdot

Mallinnettavan alue rajattiin niin, että osa alueen reunoista muodostaisi luonnollisia reunaehdoja. Mallinnusalueen länsi- ja itä-reuna valittiin niin, että ne olisivat pohjaveden virtauksen pääsuunnan suuntaisia. Näin meneteltäessä länsi- ja itä-reunojen yli tapahtuvan virtauksen voitiin arvioida olevan vähäistä, eikä näille reunoille määritetty reunaehdoja. Suurin osa alueelle virtaavasta pohjavedestä tulee alueen pohjoisreunalta, jolle määritettiin reunaehdoksi virtaama.

Mallinnettavan alueen itä-eteläreunassa kulkevan Keravanjoen pinnankorkeus määritettiin pysymään vakiona, ja pohjavedenpinnan yhtyvän joen vedenpinnan korkeuteen. Keravanjoen pinnankorkeuden lähtötietona käytettiin Pöyry Finland Oy:lta saatua maanmittauslaitoksen tuottamaa laserkeilausaineistoa. Laserkeilausaineistosta määritetty Keravanjoen pinta ei aivan vastaa todellista tilannetta, sillä pinta vuorotellen nousee ja laskee joen virtauksen suunnassa. Laserkeilausaineistosta määritettiin silmämääräisesti Keravanjoen keskikorkeus, jota käytettiin mallinnuksessa. Kuvassa 23 näkyy laserkeilausaineiston Keravanjoen pinta ja siitä mallinnusta varten määritetty Keravanjoen keskiarvopinta.

Keravanjoessa on pato, jonka toisella puolella vedenpinta on noin 5 metriä korkeammalla kuin toisella puolella. Padon aiheuttama vedenpinnan jyrkkä lasku vaikuttaa mallinnettavaan pohjavedenpintaan, koska pohjavedenpinnan on myös laskettava jyrkästi lähellä Keravanjokea.

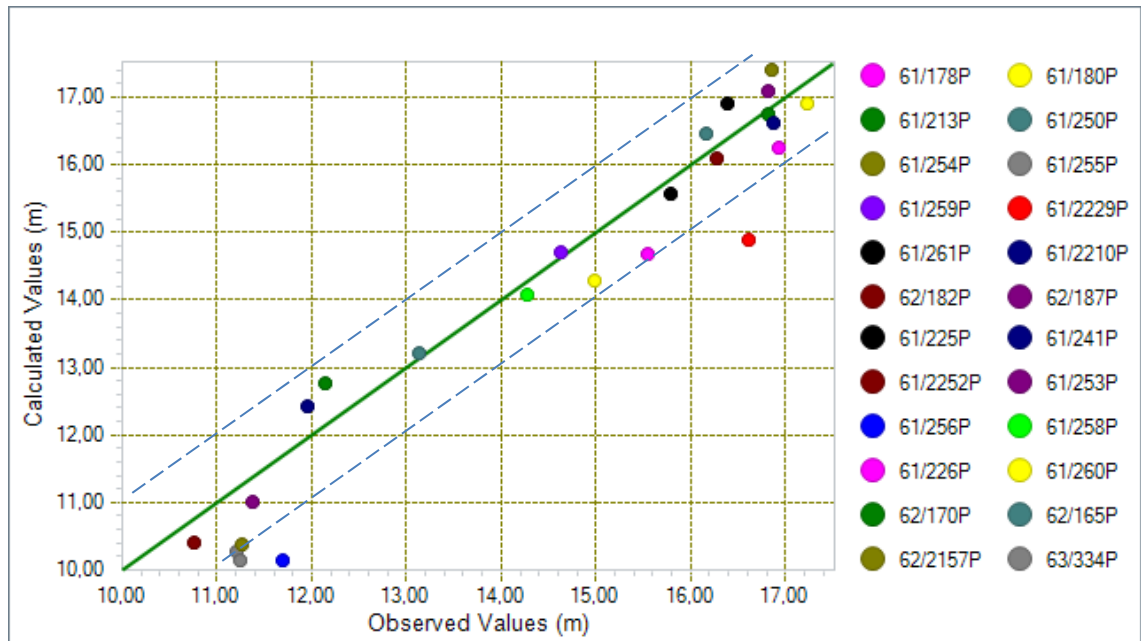


Kuva 23. Laserkeilauksesta saatu Keravanjoen pinnankorkeus ja mallinnuksessa käytetty Keravanjoen pinnankorkeus.

6.4 Mallin kalibrointi, herkkyystarkastelu ja validointi

Malli kalibroitiin yritys-erehdys-tekniikalla vertaamalla mallilla simuloitua pohjavedenpintaa pohjavesiputkista mitattuun pohjavedenpinnan korkeuteen. Kalibroinnissa käytettiin havaintojaksolla 19.10.–22.11.2010 tehtyjä mittauksia pohjavedenpinnan korkeudesta. Tällä ajanjaksolla uusien maanalaisten tilojen rakentaminen ei ollut vielä alkanut. Kalibroinnissa käytettyjen pohjavesiputkien tiedot on esitetty liitteessä 4.

Eri maakerrosten vedenläpäisevyyskerrointa ja mallinnusalueen pohjoisreunalta tulevaa virtaamaa muutettiin, kunnes simuloitu pohjavedenpinta vastasi mitattua pohjavedenpintaa pääasiassa metrin tarkkuudella. Pohjavesimallilla simuloidun pohjavedenpinnan vastaavuutta mitattuun pohjavedenpintaan on havainnollistettu kuvassa 24. Keravanjokea lähellä olevien pohjavesiputkien mitatut pohjavedenpinnan korkeudet olivat noin 1–2 metriä korkeammalla kuin muodostetulla mallilla lasketut pohjavedenpinnan korkeudet.



Kuva 24. Pohjavesimallilla simuloidun pohjavedenpinnan ja mitatun pohjavedenpinnan vastaavuus.

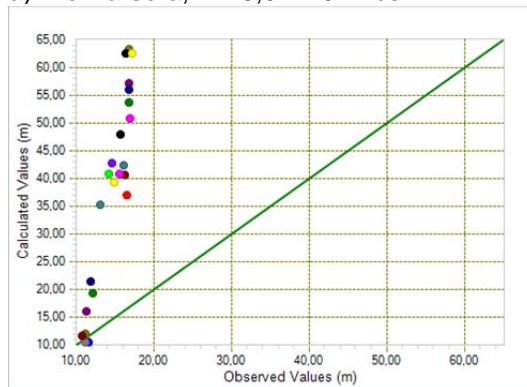
Maakerrosten kalibroittujen vedenläpäisevyyskertoimien lisäksi pohjavesimallilla voidaan saada samanlaisia tuloksia useilla eri maakerrosten vedenläpäisevyyskertoimien yhdistelmillä. Mallin maakerrosten vedenläpäisevyyskertoimille suoritettiin herkkyys-tarkastelu, jossa vuorotellen poikkeutettiin yhden maakerroksen vedenläpäisevyysker-toimen arvoa taulukossa 6 esitetyllä arvolla. Moreeni- ja hiekka-sorakerroksen vedenlä-päisevyyskertoimien herkkyystarkastelussa minimi- ja maksimiarvoina käytettiin näyt-teiden raejakaumista määritettyjä vedenläpäisevyyskertoimien minimi- ja maksimiarvo-ja. Ruhjeiselle kalliolle käytettiin taulukossa 4 esitettyjä kallion rikkonaiselle pintaosalle määritettyjen vedenläpäisevyyskertoimien minimi- ja maksimiarvoja. Ohjelmalla simu-loitiin pohjavesioloja uusilla vedenläpäisevyyskertoimien yhdistelmillä ja verrattiin saa-tuja tuloksia kalibroinnissa käytettyihin pohjavedenpinnan korkeuksiin.

Taulukko 6. Kalibroinnissa määritetyt maakerrosten vedenläpäisevyyskertoimet sekä herkkyystarkastelussa parametrien poikkeuttamisessa käytetyt vedenläpäisevyyskertoimet

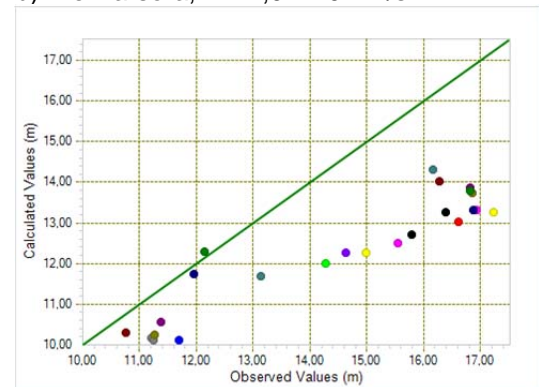
| Maalaji | Kalibroitu vedenläpäisevyys [m/s] | Herkkyystarkastelussa käytetty vedenläpäisevyys | |
|-------------------|---|--|----------------------|
| | | minimi [m/s] | maksimi [m/s] |
| Savi | $1,0 \times 10^{-8}$ | | |
| Hiekka- ja sora | $8,5 \times 10^{-5}$ | $8,0 \times 10^{-7}$ | $1,0 \times 10^{-3}$ |
| Moreeni | $4,5 \times 10^{-6}$ | $2,0 \times 10^{-9}$ | $9,5 \times 10^{-5}$ |
| Ruhjeinen kallio | $2,0 \times 10^{-6}$ | $2,5 \times 10^{-9}$ | $2,0 \times 10^{-6}$ |
| Yhtenäinen kallio | $1,0 \times 10^{-10}$ | | |

Herkkyystarkastelussa ensimmäisenä poikkeutettiin hiekka- ja sorakerroksen vedenläpäisevyyskerrointa. Hiekka- ja sorakerroksen vedenläpäisevyyskerrointen minimi- ja maksimiarvoilla mallinnetun pohjavedenpinnan vastaavuutta mitattuun pohjavedenpinnan korkeuteen on havainnollistettu kuvassa 25.

a) Hiekka-sora, $k = 8,0 \times 10^{-7}$ m/s



b) Hiekka-sora, $k = 1,0 \times 10^{-3}$ m/s



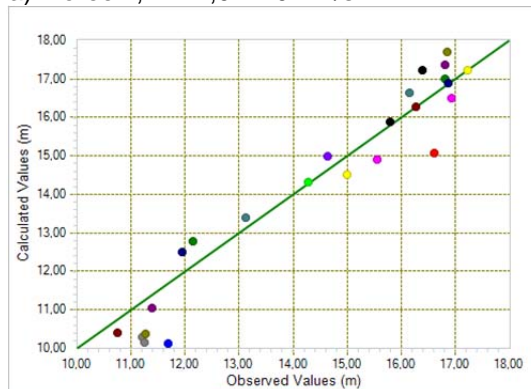
Kuva 25. Hiekka- ja sorakerroksen a) pienellä ja b) suurella vedenläpäisevyyskerrointen arvolla simuloidun pohjavedenpinnan ja mitattujen pohjavedenpinnan tasojen vastaavuudet.

Kun hiekka- ja sorakerrokselle käytettiin pientä vedenläpäisevyyskerrointa ja alueen pohjoisreunalta tuleva virtaama pidettiin vakiona, alkoi mallinnusalueella pohjaveden painekorkeus nousta huomattavasti. Käytettäessä suurta vedenläpäisevyyskerrointa hiekka- ja sorakerrokselle, oli simuloitu pohjavedenpinta enimmillään hieman yli 4 metriä alempana kuin mitattu pohjavedenpinta.

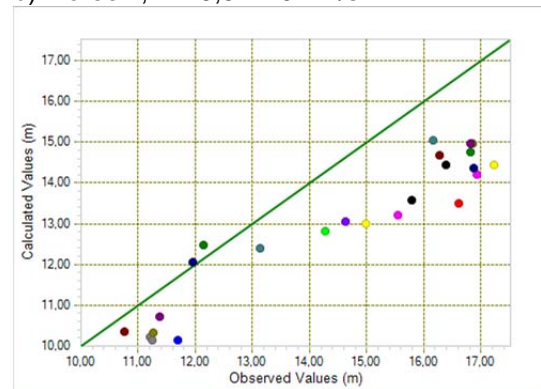
Simuloitujen pohjavedenpinnan tasojen muutos eri parametriyhdistelmien välillä oli vähäisempi Keravanjoen lähellä. Tämä johtuu siitä, että Keravanjoesta alkaa virrata vettä mallinnusalueelle, kun pohjavedenpinnan gradientti on lähes vaakasuora. Kuitenkin jos maakerroksen vedenläpäisevyys oli huomattavan hyvä, on pohjoisreunalta tulevan virtaamakin oltava suurempi, sillä oletettavasti maakerros jatkuu vedenläpäisevyydeltään samankaltaisena mallinnusalueelta pohjoiseen.

Moreenikerroksen vedenläpäisevyyskertoimen poikkeuttamisen vaikutus mallilla simuloituun pohjavedenpintaan on esitetty kuvassa 26. Moreenikerroksen arvojen muuttaminen ei vaikuttanut yhtä paljon mallin toimintaan kuin hiekka- ja sorakerroksen vedenläpäisevyyskertoimen muuttaminen. Moreenikerroksen pienellä vedenläpäisevyyden arvolla mallilla simuloidut pohjavedenpinnan korkeudet vastaavat suhteellisen hyvin mitattuja pohjavedenpinnan tasoja. Kun moreenikerroksen vedenläpäisevyyskerroin on suuri, eroaa mallilla simuloitu pohjavedenpinta enimmillään 3 metriä mitatusta pohjavedenpinnasta.

a) Moreeni, $k = 2,0 \times 10^{-9}$ m/s

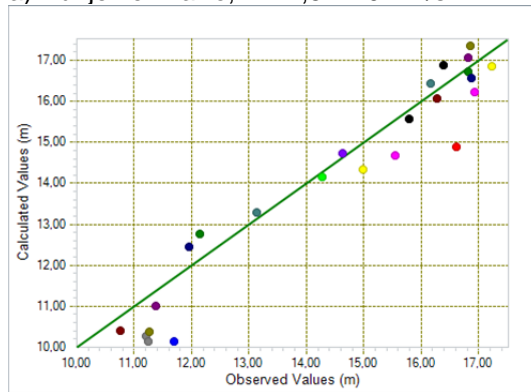
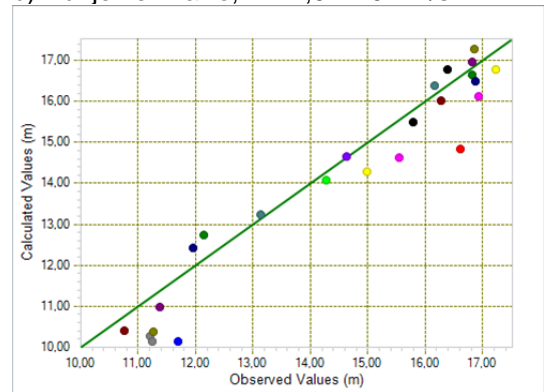


b) Moreeni, $k = 9,5 \times 10^{-5}$ m/s



Kuva 26. Moreenikerroksen a) pienellä ja b) suurella vedenläpäisevyyskertoimen arvolla simuloidun pohjavedenpinnan ja mitattujen pohjavedenpinnan tasojen vastaavuudet.

Lopuksi poikkeutettiin kallion ruhjeisen pintaosan vedenläpäisevyyskerrointa (kuva 27). Kallion ruhjeisen pintaosan vedenläpäisevyyskertoimen poikkeuttaminen ei vaikuttanut havaittavasti mallilla simuloituun pohjavedenpintaan. Todennäköinen syy vedenläpäisevyyskertoimien poikkeuttamisen olemattomaan vaikutukseen oli se, että ruhjeiselle kalliolle käytetty korkeampi vedenläpäisevyys oli kuitenkin pienempi kuin hiekka- ja sorakerroksen vedenläpäisevyys. Tällöin pohjavesi virtaa edelleen pääasiassa hiekka- ja sorakerrosta pitkin.

a) Ruhjeinen kallio, $k = 2,5 \times 10^{-9}$ m/sb) Ruhjeinen kallio, $k = 2,0 \times 10^{-6}$ m/s

Kuva 27. Ruhjeisen kallion a) pienellä ja b) suurella vedenläpäisevyysskerroimen arvolla simuloidun pohjavedenpinnan ja mitattujen pohjavedenpinnan tasojen vastaavuudet.

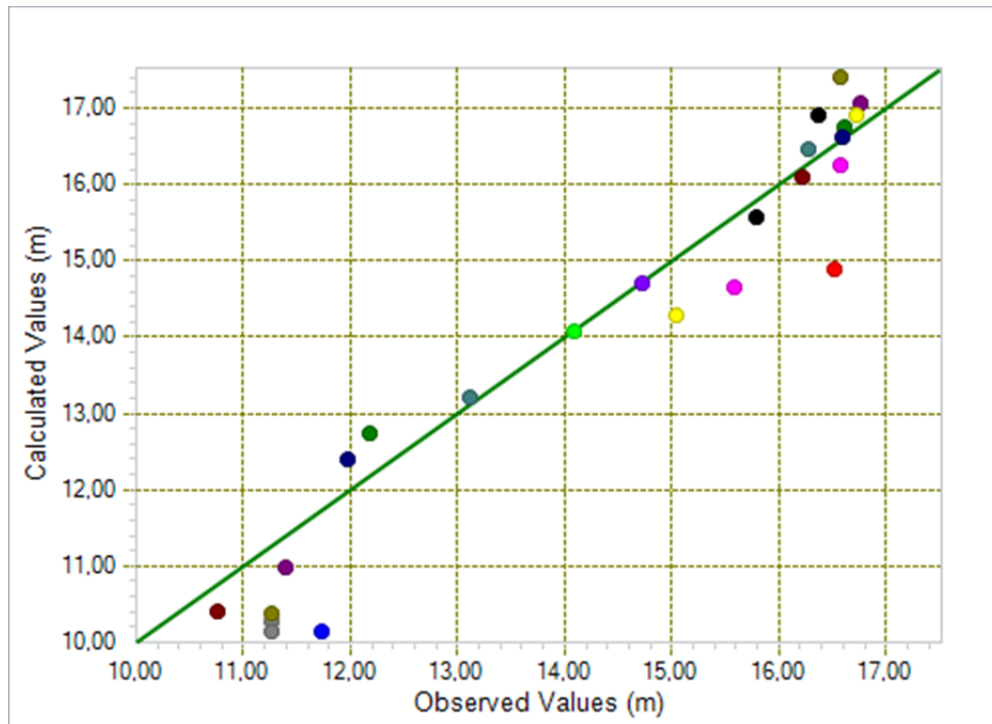
Herkkyystarkastelussa huomattiin, että moreenikerroksen vedenläpäisevyysskerrointa pienentämällä simuloitu pohjavedenpinta vastasi paremmin mitattua pohjavedenpinnan korkeutta kuin yritys-erehdys-tekniikalla kalibroiduilla vedenläpäisevyysskerroimilla. Ennusteajoja varten moreenikerroksen vedenläpäisevyysskerroin muutettiin arvoksi $k = 4,5 \times 10^{-7}$ m/s. Ennusteajoissa käytetyt vedenläpäisevyysskerroimet, tilavuusvesipitoisuudet ja mallinnusalueen pohjoisreunalle eri kerroksille asetetut virtaamat on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Ennusteajoissa maakerroksille käytetyt vedenläpäisevyysskerroimet, tilavuusvesipitoisuudet ja kerroksille alueen pohjoisreunalta tuleva virtaama

| Maalaji | Kalibroitu vedenläpäisevyyss- kerroin [m/s] | Tilavuus- vesipitoisuus θ_w | Virtaama pohjoisreunalta [m ³ /s/m ²] |
|-------------------|--|--|--|
| Savi | $1,0 \times 10^{-8}$ | 0,5 | $5,0 \times 10^{-11}$ |
| Hiekka- ja sora | $8,5 \times 10^{-5}$ | 0,35 | $5,0 \times 10^{-7}$ |
| Moreeni | $4,5 \times 10^{-7}$ | 0,4 | $3,0 \times 10^{-9}$ |
| Ruhjeinen kallio | $2,0 \times 10^{-6}$ | 0,1 | $5,0 \times 10^{-10}$ |
| Yhtenäinen kallio | $1,0 \times 10^{-10}$ | 0,1 | |

Mallin kalibroinnin ja herkkyystarkastelun jälkeen oli vielä varmistettava, että simuloitu pohjavedenpinta vastaa myös toisella ajanjaksolla tehtyjä pohjavedenpinnan korkeusha-

vaintoja. Malli validoitiin vertaamalla mallilla simuloituja pohjavedenpintoja ajanjaksoilla 29.10.–4.11.2009 mitattuun pohjavedenpinnan tasoon (kuva 28).



Kuva 28. Simuloidun pohjavedenpinnan vastaavuus loka-marraskuussa 2009 mitattuihin pohjavedenpinnan tasoihin.

6.5 Ennustejot

Kun ennen maanalaisten tilojen rakentamista vallinneen tilanteen pohjavesimalli oli valmis, voitiin malliin sijoittaa rakennukset, joiden vaikutuksia mallinnuksessa haluttiin tarkastella. Rakennukset sijoitettiin malliin alueina, joiden kohdalla maakerroksissa ei tapahdu virtausta. Koska rakennusten kohdalla kalliota injektoitiin, määritettiin rakennusten kohdalla ruhjeisen kallion vedenläpäisevyydeksi sama kuin kiinteän kallion vedenläpäisevyys.

Ennustejoiissa tarkasteltiin seuraavia tilanteita:

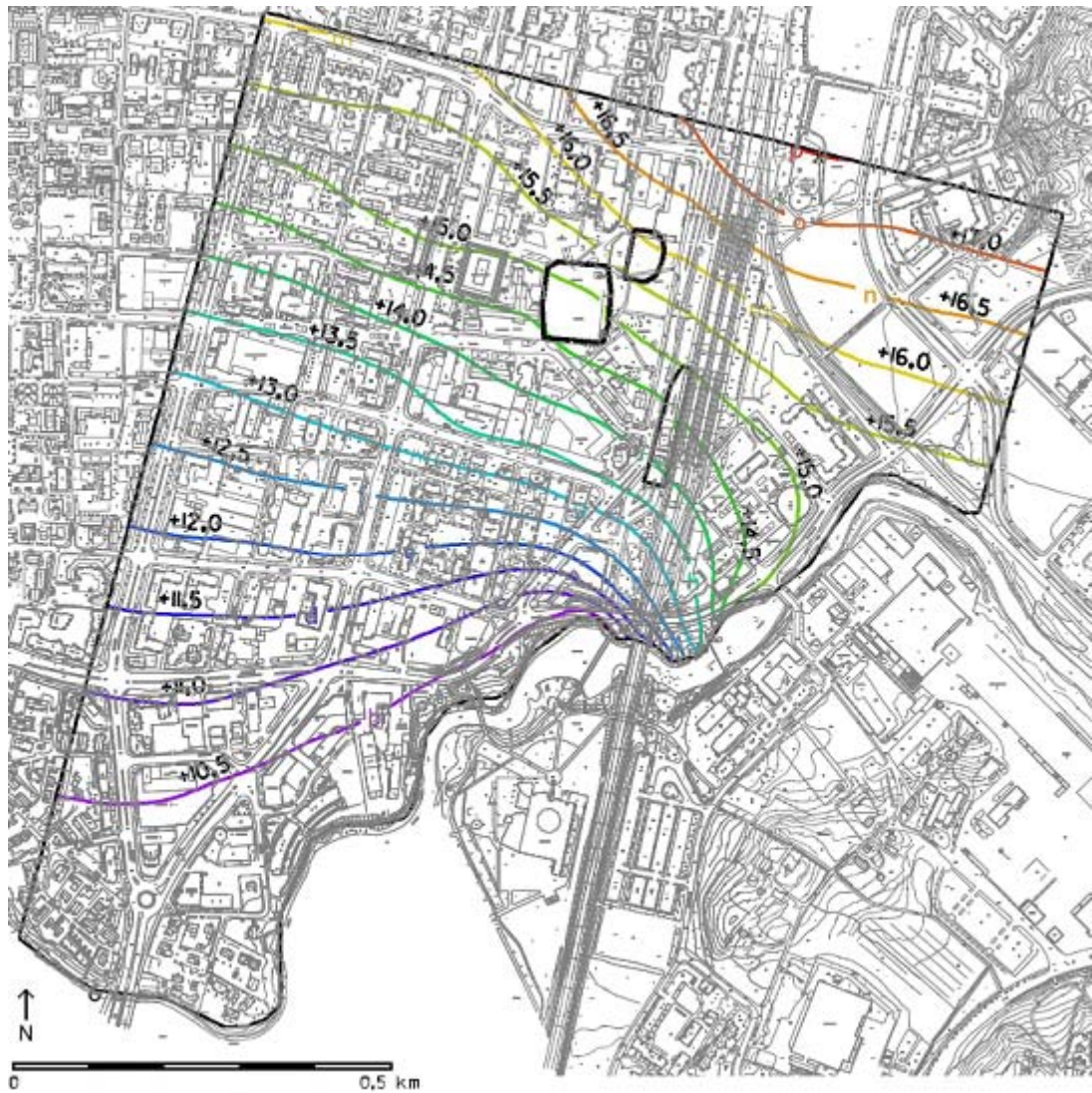
1. Tikkuparkin, Ratakujan parkkitalon ja asemakeskus Dixin kellaritilojen pysyvä yhteisvaikutus mallinnusalueen pohjavedenpintaan ja -virtaukseen.
2. Rakennusten pysyvä vaikutus pohjavedenpintaan ja -virtaukseen, kun rakennusten ympärille maakerrokseen on rakennettu metrin paksuinen sepelitäyttö.

Mallinnuksessa käytetty elementtiverkko perustilanteelle ennen maanalaisten tilojen rakentamista on esitetty liitteessä 5. Liitteessä 6 näkyy ennusteajoissa käytetty elementtiverkko. Eri mallinnustilanteissa käytettyjen elementtiverkkojen erona on vain se, ovatko maanalaiset tilat osana verkkoa vai onko niiden kohdalla tyhjä tila. Elementtiverkon elementtien koko oli eri kerroksissa vaakasuunnassa suurin piirtein sama. SoilVision muodostaa elementtiverkon automaattisesti ohjelmalle annettujen parametrien perusteella.

7 Tutkimustulokset

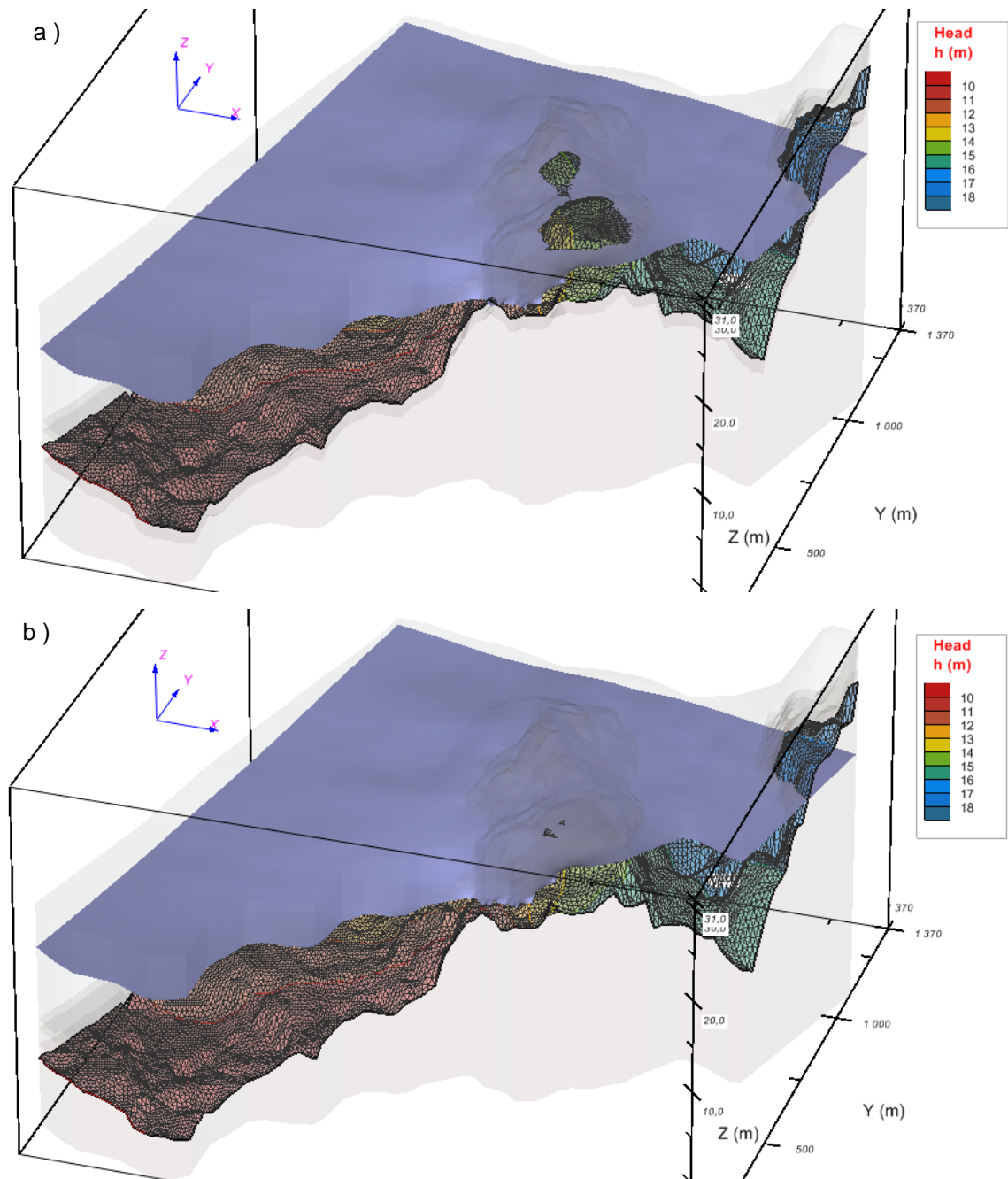
7.1 Pohjavesiolot ennen uusien maanalaisten tilojen rakentamista

Valmiilla pohjavesimallilla simuloitu pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrästä ennen maanalaisten tilojen rakentamista on esitetty kuvassa 29. Kuvassa näkyvät uudet maanalaiset tilat, mutta ennen varsinaisia ennusteajoja rakennusten kohdalla käytettiin kalliolle ja maakerroksille samoja ominaisuuksia kuin muualla mallinnusalueella. Mallinnettu pohjavedenpinta vastaa noin metrin tarkkuudella mitattua pohjavedenpinnan tasoa.



Kuva 29. Pohjavesimallilla simuloitu pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrästä ennen maanalaisten tilojen rakentamista.

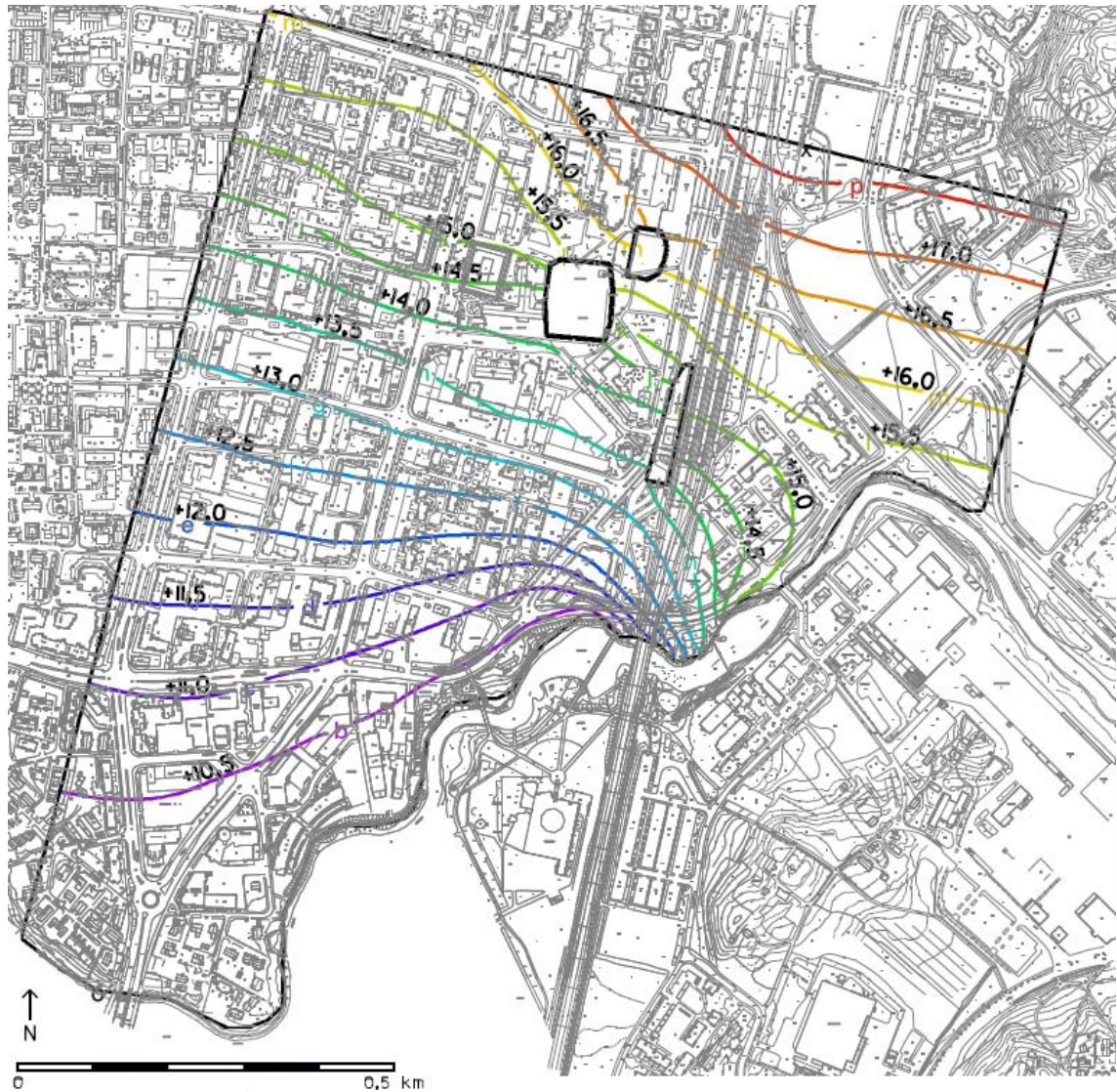
Kuvassa 30 on esitetty simuloitu pohjavedenpinta ja kiinteän kallion sekä rikkonaisen kallion pintamallit. Pohjavedenpinta on alueella korkeammalla kuin kiinteän kallion yläpinta, mutta ruhjeisen kallion pintaosa on kalliokynnyksen kohdalla vähän korkeammalla kuin pohjavedenpinta.



Kuva 30. Mallilla simuloitu pohjavedenpinta ja mallissa käytetty a) ruhjeisen ja b) kiinteän kallion yläpinta.

7.2 Maanalaisten tilojen vaikutus pohjavesioloihin

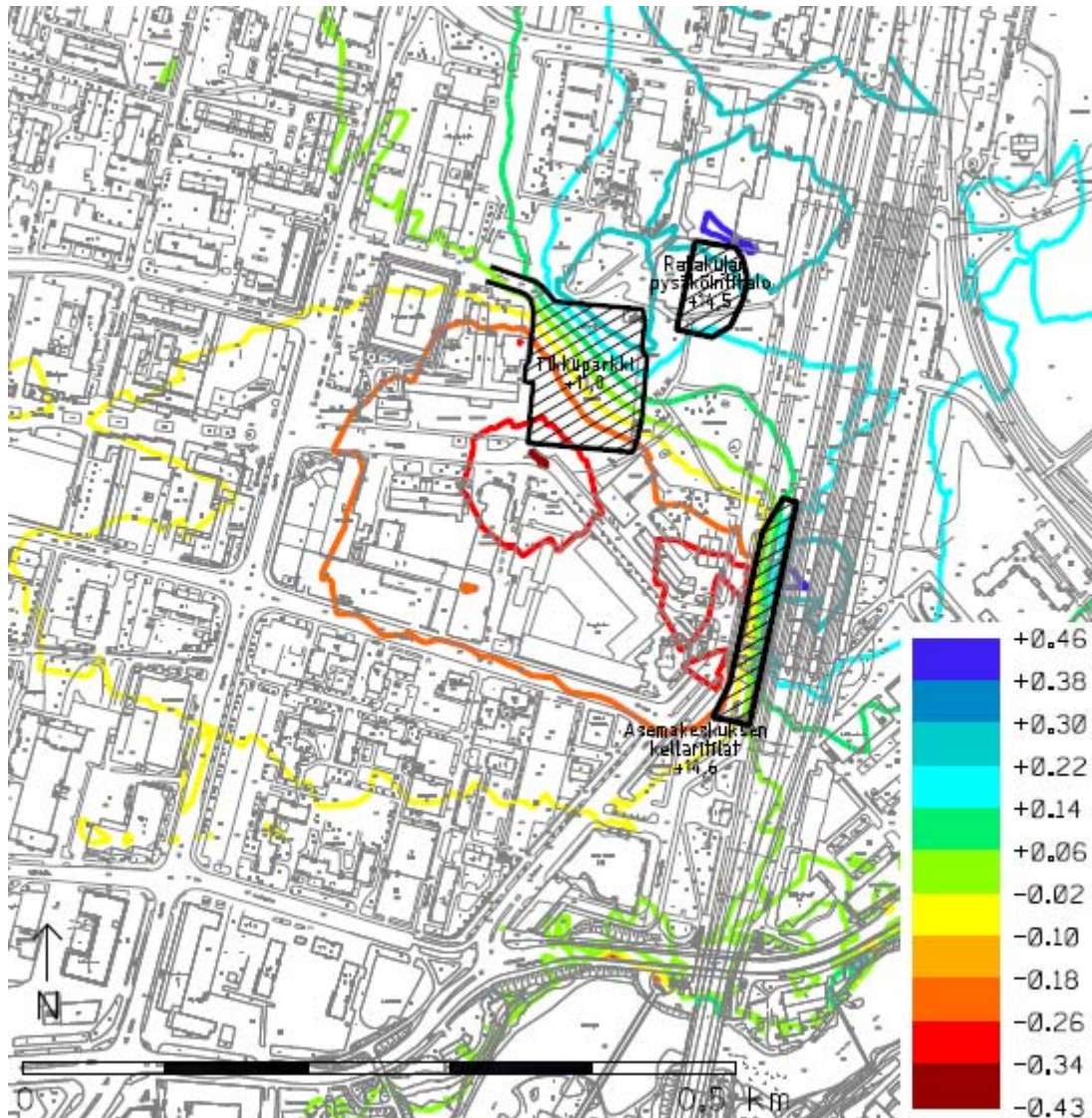
Varsinaisilla ennusteajoilla tarkasteltiin uusien maanalaisten tilojen pitkän ajan vaikutusta tutkimusalueen pohjavedenpinnan tasoihin. Kuvassa 31 on esitetty pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrät, kun pohjavesimalliin on sijoitettu uudet maanalaiset tilat.



Kuva 31. Pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrät, kun maanalaiset tilat on rakennettu.

Pohjavesimallilla simuloidut pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrät ennen maanalaisten tilojen rakentamista (kuva 29) ja rakentamisen jälkeen (kuva 31) digitoitiin. Digitoitujen pintojen välisellä erotuksella saatiin maanalaisten tilojen aiheuttama pitkäaikainen pohjavedenpinnan tason muutos (kuva 32).

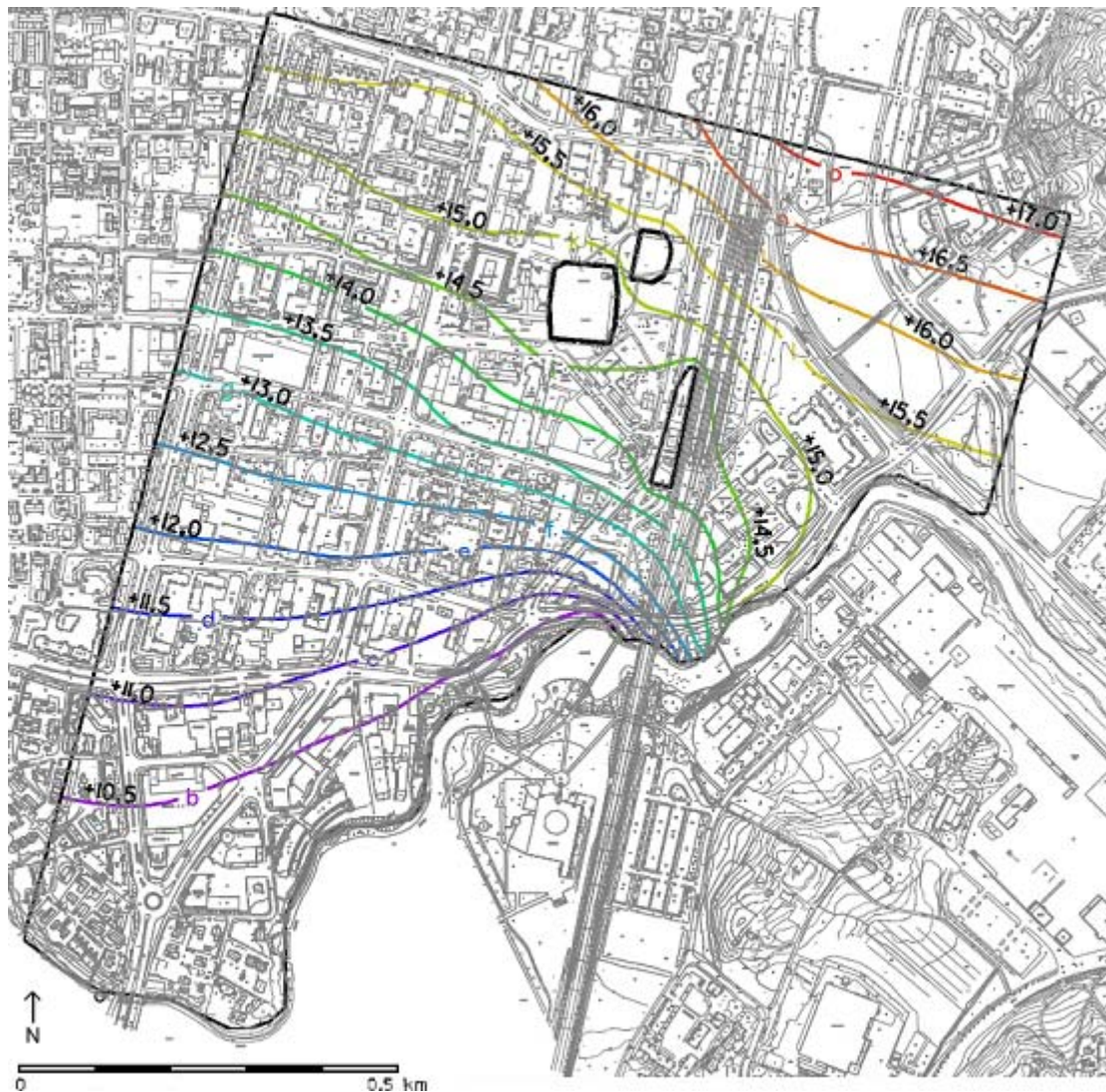
Tikkuparkin lounaiskulmalla pohjavedenpinta alenee pitkän ajan kuluessa noin 0,3 m. Pohjavedenpinnan alenema on 0,1 m vielä 200–300 m etäisyydellä Tikkuparkista. Ratakujan pysäköintitalon koillispuolella sekä asemakeskus Dixin itä-koillispuolella pohjavedenpinta nousee noin 0,3–0,4 m. Pohjavedenpinnan nousu on 0,1 m on vähän yli 100 m etäisyydellä itään asemakeskuksesta ja ainakin 200 m etäisyydellä koilliseen Ratakujan pysäköintitalosta.



Kuva 32. Maanalaisten tilojen pitkäaikainen yhteisvaikutus pohjavedenpinnan tasoon. Rakennusten itä- ja koillispuolella pohjavedenpinta nousee ennen uusien tilojen rakentamista olleeseen pohjavedenpinnan tasoon verrattuna. Rakennusten länsi- ja lounaispuolella pohjavedenpinta puolestaan laskee.

7.3 Ympäristäytön vaikutus

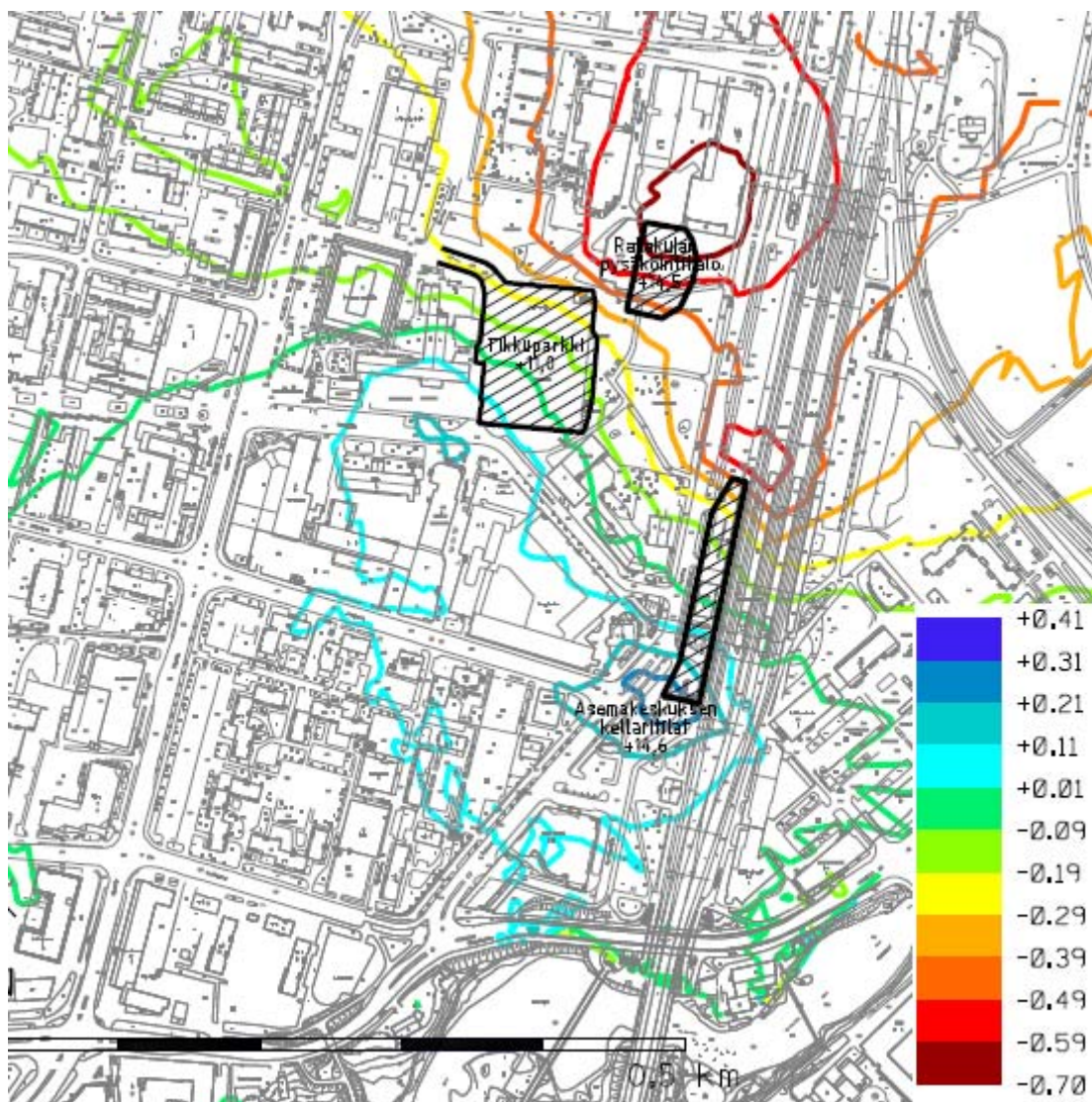
Maanalaisten tilojen rakentamisen pitkäaikaisten vaikutusten lisäksi tarkasteltiin rakennusten ympärille rakennettujen metrin paksuisten sepelitäyttöjen vaikutusta pohjavedenpintaan ja -virtaukseen. Laskennoissa on tarkasteltu 1,0 m paksuista maanpinnalta kallionpintaan ulottuvaa täyttökerrosta, jonka vedenläpäisevyyskerroin on $1,0 \times 10^{-1}$ m/s. Pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrästä, kun maanalaisten tilojen ympärillä on metrin paksuinen sepelitäyttö, on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrät, kun maanalaisia tiloja ympäröiviin maa-kerroksiin on rakennettu metrin paksuinen sepelitäyttö.

Sepelitäytön vaikutusta kuvannut pohjavedenpinta (kuva 33) digitoitiin ja digitoitua pintaa verrattiin ennen rakentamisesta vallinneeseen pohjavedenpintaan (kuva 29). Pintojen erotuksena saadun pinnan tasa-arvokäyrät on esitetty kuvassa 34.

Metrin paksuisen, hyvin vettä johtavan seplitäytön vaikutuksesta pohjavedenpinta nousee Tikkuparkin lounaiskulmalla noin 0,3 m ja asemakeskuksen lounaiskulmalla noin 0,4 m verrattuna ennen rakentamista olleeseen pohjavedenpintaan. Pohjavedenpinnan nousu on 0,1 m 100–150 m etäisyydellä lounaaseen Tikkuparkista ja asemakeskus Dixistä. Pohjavedenpinta laskee Ratakujan pysäköintitalon koillispuolella 0,6 m. Pohjavedenpinta laskee yli 0,3 m vielä noin 150 m etäisyydellä pohjois-koilliseen Ratakujan pysäköintitalosta. Asemakeskus Dixin koillispuolella pohjavedenpinta laskisi noin 0,4 m ennen rakentamista olleeseen pohjavedenpinnan tasoon verrattuna. 0,3 m alenema ulottuisi suunnilleen 300 m etäisyydelle pohjoiseen asemakeskus Dixistä.



Kuva 34. Maanalaisten tilojen ympärille rakennetun seplitäyttökerroksen vaikutus pohjavedenpinnan tasoon. Vertailutasona on käytetty ennen uusien maanalaisten tilojen rakentamista vallinnutta pohjavedenpinnan tasoa.

7.4 Mallin luotettavuus

Mallissa on tehty useita yksinkertaistuksia mallinnusajan lyhentämiseksi ja tutkimuksen selkeyttämiseksi. Koska alueella maaperän on todettu olevan epähomogeenista, ei maaperän kuvaaminen koko mallinnusalueen läpi ulottuvina kolmena homogeenisena ja isotrooppisena maakerroksena ole kovin totuudenmukaista.

Mallinnusta varten käytettävissä oli runsaasti pohjatutkimuksia ja pohjavesihavaintoja. Pohjatutkimuksiin tulee kuitenkin suhtautua varauksella, sillä niitä on tehty eri vuosina, eri kalustoilla ja eri henkilöiden toimesta. Lisäksi vuosien aikana Tikkurilassa on rakennettu paljon, minkä seurauksena maaperän ominaisuuksia on muokattu, kuormitustilan- teet ovat vaihdelleet ja pohjavettä on alennettu ainakin työaikaisesti useaan kertaan.

Koska pohjatutkimuksia on ollut paljon, on kolmiulotteinen rakennemalli muodostettu automaattisesti xyz-muodossa olleiden pistetietojen perusteella. Mallinnuksessa maakerrosten oletettiin jatkuvat yhtenäisinä koko tutkimusalueella, vaikka esimerkiksi kal- lio on paikoin paljastuneena. Maakerroksia muodostettaessa maakerroksille asetettiin z-suuntaiseksi minimietäisyydeksi 1 metri. Minimietäisyys asetettiin niin, että ensin verrattiin kallion ja alimman maakerroksen välistä etäisyyttä ja nostettiin maakerrosta niillä kohdin, joissa se olisi muuten ollut liian lähellä kalliota tai mennyt ristiin kallionpinnan kanssa. Tällöin kallionpinta vastaa parhaiten lähtötietoina käytettyjä kallionpinnan kor- keustietoja.

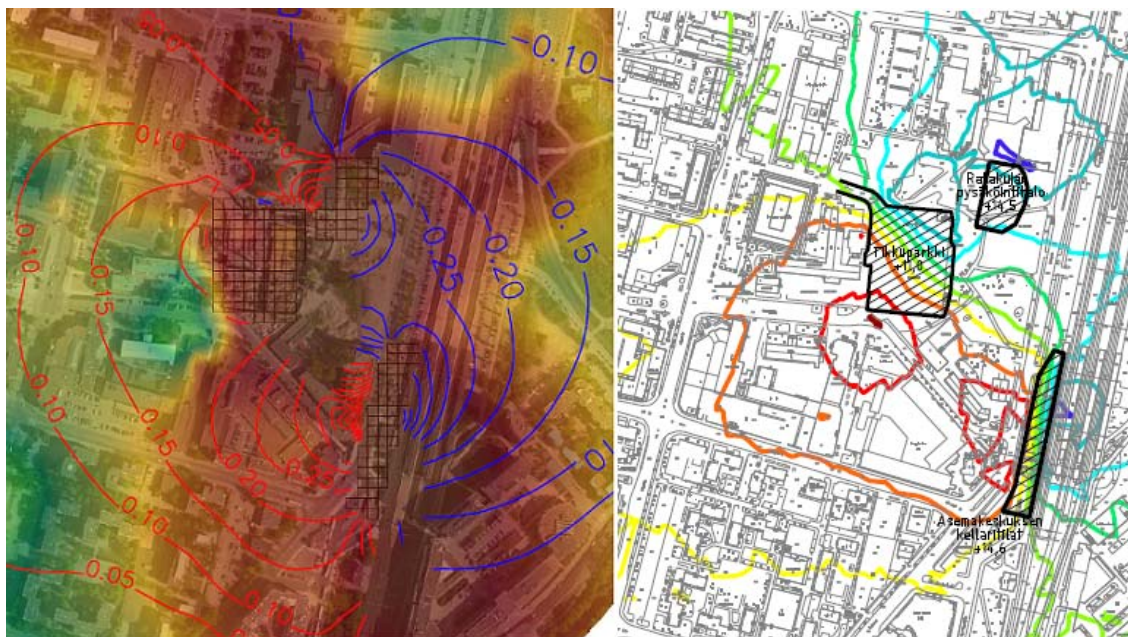
Kalibroinnissa ongelmana olivat Keravanjokea lähellä olevat pohjavesiputkien pohja- vesihavainnot, jotka olivat mallilla laskettuun pohjavedenpinnan korkeuteen verrattuna noin 2 metriä korkeammalla. On mahdollista, että malliin asetettujen maakerrosten ve- denläpäisevyyskertoimien tulisi olla pienempiä joen läheisyydessä. Toisaalta pohjavesi ei välttämättä yhdy Keravanjokeen kaikilla kohdin, vaan pohjaveden painekorkeus on korkeammalla kuin joenpinnan korkeus. Lisäksi jos pohjavesi yhtyy Keravanjokeen kaikilla kohdin, voi virtaava vesi aikaansaada sen, ettei Keravanjoen pinnankorkeus ole sama kuin pohjaveden painekorkeus lähellä Keravanjokea.

7.5 Tulosten vertailu Pöyryn laatimalla mallilla saatuihin tuloksiin

Tässä työssä muodostetulla pohjavesimallilla saatuja tuloksia verrattiin Pöyryn laajemalta alueelta laatimalla pohjavesimallilla saatuihin tuloksiin. Molempien pohjavesimallien geometriat on muodostettu käyttäen samoja pohjatutkimuksista määritettyjä maakerrosten korkeustasoja, mutta mallien maakerrokset on jaoteltu eri tavalla. Tässä työssä hiekka- ja sorakerros mallinnettiin yhtenä maakerroksena, ja kallio jaettiin kiinteään ja ruhjeiseen osaan. Pöyryn laatimassa mallissa maakerroksia oli viisi ja kallionpinta oli määritetty vettäläpäisemättömäksi pohjaksi. Pohjavesimalleissa käytettiin maakerroksille eri vedenläpäisevyyskertoimia ja mallit on kalibroitu osittain eri ajanjaksojen pohjavesimittauksilla.

Tässä työssä muodostetulla pohjavesimallilla saatiin maanalaisten tilojen aiheuttamalle pohjavedenpinnan muutokselle suuruusluokaltaan samanlaisia tuloksia kuin Pöyryn mallilla on saatu. Pohjavedenpinnan suurin alenema sijoittui kuitenkin malleissa eri kohdille (kuva 35). Pöyryn mallissa suurimmat pohjavedenpinnan alenemat sijoituivat asemakeskus Dixin länsipuolelle, jossa alenema oli noin 0,3 m 50 m etäisyydellä rakennuksesta. Tikkuparkin lounaispuolella pohjavedenpinnan alenema oli 0,15–0,2 m. Tämän työn mallissa suurimmat alenemat sijoituivat Tikkuparkin lounaispuolelle, mutta pohjavedenpinta aleni myös asemakeskuksen länsipuolella.

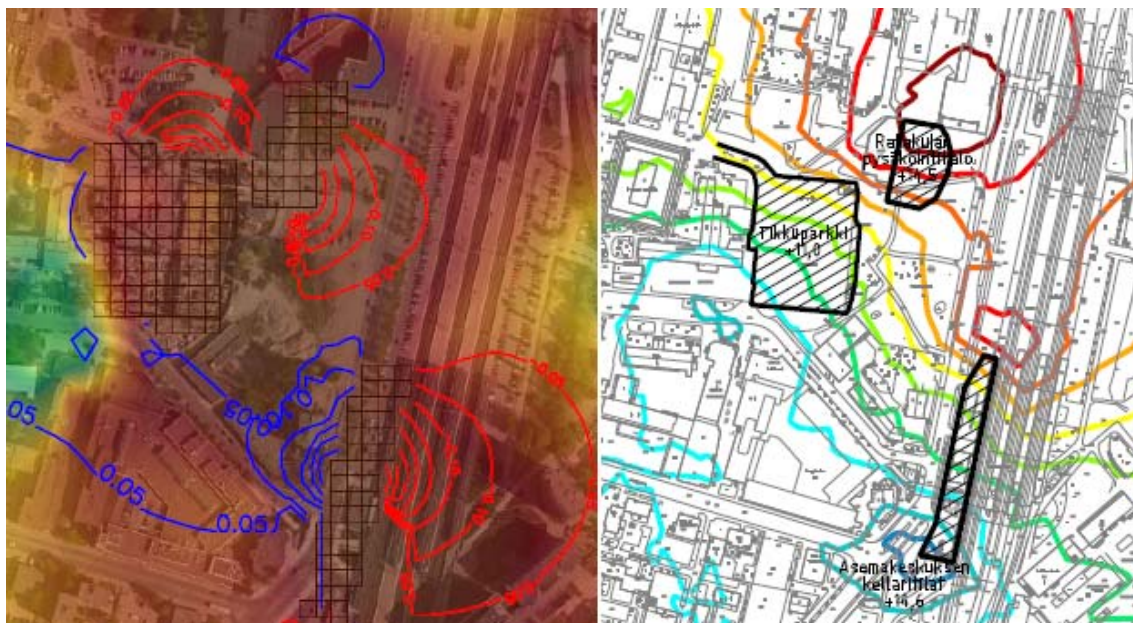
Pöyryn mallissa pohjavedenpinta nousi 0,2 m noin 100 m etäisyydellä asemakeskuksesta itään ja Ratakujan pysäköintitalosta itä-kaakkoon. Tämän työn mallissa pohjavedenpinnan nousu keskittyi Ratakujan pysäköintitalon ja asemakeskuksen pohjoiskoillispuolelle, jossa nousu oli 0,2–0,3 m.



Kuva 35. a) Pöyryn mallilla (Hakoniemi & Mäki-Torkko 2013) ja b) tässä työssä muodostetulla mallilla laskettu pohjaveden alenema rakennusten ympäristössä.

Kun malleilla tarkasteltiin rakennusten ympärille rakennettavan hyvin vettä johtavan täytön vaikutuksia (kuva 36), oli mallien välillä enemmän eroja kuin mitä maanalaisten tilojen pitkäaikaisvaikutusten vertailussa tuli ilmi. Pöyryn mallilla simuloitu pohjavedenpinta laski vain noin 0,1 m Ratakujan pysäköintitalon itä-kaakkoispuolella ja asemakeskuksen itäpuolella. Pohjavedenpinnan lasku rajoittui alle 100 m etäisyydelle molemmista rakennuksista. Tämän työn mallissa pohjavedenpinta laski jopa 0,6 m Ratakujan pysäköintitalon ja asemakeskuksen pohjoispuolella. Pohjavedenpinnan lasku ulottui myös kauemmas.

Sepelitäytöllä aikaansaatu pohjavedenpinnan nousu oli Pöyryn mallissa vähäistä, ja se rajoittui asemakeskuksen länsipuolelle. Pohjavedenpinnan nousu oli noin 0,05 m 100 m etäisyydellä asemakeskuksesta. Tämän työn mallissa sepelitäyttö nosti pohjavedenpintaa huomattavimmin asemakeskuksen eteläpäädyssä, jossa Pöyryn mallissa ei näkynyt muutosta. Asemakeskuksen länsipuolella ei tämän työn mallissa pohjavedenpinta muuttunut sepelitäytön vaikutuksesta.



Kuva 36. a) Pöyryn mallilla (Hakoniemi & Mäki-Torkko 2013) ja b) tässä työssä muodostetulla mallilla määritetty salaojituksen vaikutus rakennusten ympäristössä.

Mallien välillä olevat erot pohjavedenpinnan alenemien ja nousujen sijainnissa johtuvat todennäköisesti siitä, että rakennukset sijoittuvat kalliokynnyksen alueelle. Tämän työn mallissa kallion ylin 1,5 metriä määritettiin johtamaan jonkin verran vettä, ja kallion ruhjeinen osa on paikoin samalla korkeudella tai korkeammalla kuin pohjavedenpinta. Tällöin pohjavedenvirtausta tapahtuu myös kalliokynnyksen läpi, vaikka kalliokynnyksen korkeimmilla kohdilla maakerrokset olisivatkin kuivia. Pöyryn mallissa kallion läpi ei tapahdu virtausta, vaan pohjaveden on kierrettävä kalliokynnyksen korkeimmat kohdat. Kun kalliokynnykselle sijoitetaan vettäläpäisemättömät, kallionpintaan ulottuvat rakennukset, kasvattavat ne kalliokynnyksen muodostamaa estettä entisestään. Kallion vedenläpäisevyydestä johtuen malleilla simuloitu pohjaveden virtaus suuntautuu kalliokynnyksen kohdalla eri tavalla, ja siksi pohjavedenpinta alenee ja nousee malleissa eri kohdissa.

Pohjavesimalleilla rakennusten ympärille rakennettavan täytön vaikutuksille saadut erilaiset tulokset johtuvat siitä, että malleissa täytölle käytetyt vedenläpäisevyyskertoimet poikkeavat merkittävästi toisistaan ja osittain myös siitä, että salaojakerrokset on määritetty eri paksuisiksi. Lisäksi tämän työn mallissa maakerroksille käytettiin samaa vedenläpäisevyyskerrointa laajalla alueella.

7.6 Pohjavedenpinnan alenemisen vaikutus painumien suuruuteen

0,1 m ja 0,3 m pohjavedenpinnan alenemisen vaikutusta pehmeikön painumisen suuruuteen tarkasteltiin painumalaskelmilla. Laskelmat tehtiin NovaPoint GeoCalc -ohjelman versiolla 2.3.1. Ohjelma laskee maapohjan primaarisen konsolidaation Terzaghin yksiuotteiseen konsolidaatiopainumateoriaan perustuen. Teoriaan on lisätty mahdollisuus tarkastella ajan suhteen muuttuvia kuormia. (Vepsäläinen & Takala 2004, s. 2.)

Painumatarkastelu tehtiin uusien maanalaisten tilojen lounaispuolella sijaitsevalle tiealueelle, ja tieltä valitun leikkauksen sijainti on esitetty liitteessä 7. Saven painumaparametrit määritettiin pisteestä 5/7322 otettujen häiriintymättömille maanäytteille suoritettujen ödometrikokeiden tulosten perusteella. Karkearakeisten maakerrosten parametrit arvioitiin Tielaitoksen julkaisun (1993) liitteen 1 taulukkoarvojen avulla. Maakerroksille käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 8 ja tarkemmin liitteessä 8.

Taulukko 8. Maakerroksille painumalaskennassa käytetyt parametrit

| Maakerros | Esikonsolidaatio- jännitys σ_c [kPa] | OCR | Moduuliluku m_1 | Jännityksen eksponentti β_1 | Moduuliluku m_2 | Jännityksen eksponentti β_2 | Konsolidaatio- kerroin C_{v1} C_{v2} | |
|------------|---|-----|----------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--|-----|
| Kuivakuori | 55 | 1 | 50 | 0,5 | 100 | 0,5 | 1 | 5 |
| Savi | 55 | 1 | 7,5 | 0,1 | 15 | 1 | 0,5 | 2 |
| Siltti | | | 50 | 0,25 | 100 | 0,25 | 2 | 30 |
| Kitkamaa | | | 100 | 0,5 | 200 | 0,5 | 50 | 100 |

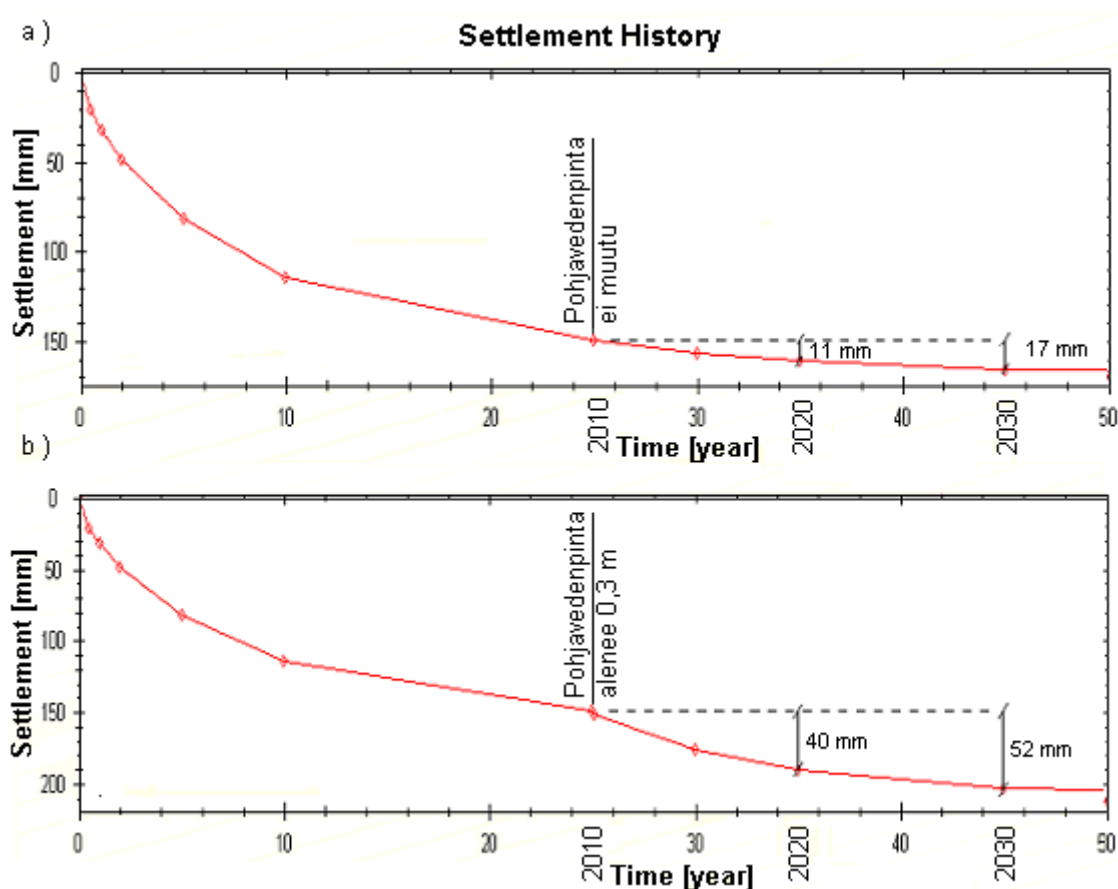
Tutkittava tiealue on rakennettu noin 25 vuotta ennen kuin tässä työssä tarkasteltavia rakennuksia on alettu rakentaa. Tien täyttökerrosten aiheuttama kuorma on huomioitu GeoCalcin kuormitushistoriassa, jossa kuorma on määritetty laaja-alaisena kuormana alkamaan laskennan alusta. Kuormitushistoriaan annettiin 25 vuoden jälkeen lisäkuormaksi pohjavedenpinnan alenemisesta aiheutuva laaja-alainen kuorma. 0,1 m pohjavedenpinnan aleneman aiheuttaman lisäkuorman suuruudeksi määritettiin 1 kN/m^2 .

GeoCalcilla laskettu 7 m paksun savikerroksen painuman suuruus 10 ja 20 vuoden kuluessa uusien maanalaisten tilojen rakentamisen alkamisen jälkeen on esitetty taulukos-

sa 9. Pohjavedenpinnan pysyessä muuttumattomana, painuu maapohja 11 mm ensimmäisen 10 vuoden kuluessa. 0,1 m pohjavedenpinnan aleneminen lisää maanalaisten tilojen lähellä maapohjan painumaa 11 mm 10 vuoden kuluessa, ja 0,3 m pohjavedenpinnan aleneminen lisää painumaa 29 mm 10 vuoden kuluessa. 20 vuoden kuluessa 0,1 m pohjavedenpinnan aleneminen lisää 10 mm maapohjan painumista, ja 0,3 m pohjavedenpinnan aleneminen lisää 35 mm maapohjan painumista (kuva 37). Pohjavedenpinnan alenemisesta aiheutuva painumalisäys on sitä suurempi, mitä enemmän pohjavedenpinta laskee.

Taulukko 9. Pohjaveden pysyvän alenemisen vaikutus painuman suuruuteen

| Pohjaveden alenema [m] | Maakerroksen painuma 10 vuodessa [mm] | Maakerroksen painuma 20 vuodessa [mm] |
|---------------------------|--|--|
| 0,0 | 11 | 17 |
| 0,1 | 22 | 27 |
| 0,3 | 40 | 52 |



Kuva 37. GeoCalcilla laskettu 7 m paksun savikerroksen painuman suuruus, kun a) pohjavedenpinta ei muutu, ja b) pohjavedenpinta laskee pysyvästi 0,3 m.

8 Johtopäätökset

Tikkurilan keskusta-alueelle rakenteilla olevat uudet maanalaiset tilat padottavat pohjaveden virtausta. Pohjavedenpinta laskee rakennusten pohjavedenvirtauksen alajuoksun puoleisella alueella ja nousee rakennusten toisella puolella eli pohjavedenvirtauksen yläjuoksun puolella. Uudet maanalaiset tilat ulottuvat vesipainerakenteisina kallionpintaan saakka, ja rakennusten alla olevaa kalliota on rakentamisen yhteydessä injektoitu.

Tässä työssä muodostetun pohjavesimallin perusteella uusien maanalaisten tilojen yhteisvaikutuksesta pohjavedenpinta laskee pysyvästi 0,3 m Tikkuparkin lounaispuolella ja asemakeskus Dixin länsipuolella, jos pohjaveden virtausmahdollisuutta rakennusten ympäri ei paranneta. Pohjavedenpinnan laskennallinen alenema on 0,1 m vielä 200–300 m etäisyydellä Tikkuparkista. Pohjavedenpinta nousee noin 0,3–0,4 m Ratakujan pysäköintitalon koillispuolella ja asemakeskus Dixin itä-koillispuolella. Pohjavedenpinnan nousu on 0,1 m pääasiassa 200 m etäisyydellä koilliseen Ratakujan pysäköintitalosta ja asemakeskus Dixistä.

Pohjavedenpinnan pitkäaikainen alenema aiheuttaisi Tikkurilan lounaispuolella sijaitsevalle tiealueelle lisäpainumia. 0,3 m pohjavedenpinnan alenema aiheuttaisi 20 vuoden kuluessa 35 mm lisäpainuman, ja 0,1 m pohjavedenpinnan aleneminen 10 mm lisäpainuman. Pohjavedenpinnan alenemisesta aiheutuva painumalisäys on sitä suurempi, mitä enemmän pohjavedenpinta laskee, ja mitä kauemmin pohjavedenpintaa on alennettu.

Jos rakennusten ympärille rakennetaan metrin paksuinen sepelitäyttö, jonka vedenläpäisevyyskerroin on 0,1 m/s, muuttuu tilanne päinvastaiseksi rakennusten padottavan vaikutukseen verrattuna. Tällöin pohjavedenpinta nousisi noin 0,3 m rakennusten lounaispuolella verrattuna ennen rakentamista olleeseen pohjavedenpinnan tasoon. Aivan asemakeskus Dixin lounaispuolella pohjavedenpinta nousisi noin 0,4 m. Pohjavedenpinnan nousu olisi 0,1 m vielä 100–150 m etäisyydellä lounaaseen Tikkuparkista ja asemakeskus Dixistä. Sepelitäyttökerroksen aiheuttama pohjavedenpinnan lasku olisi noin 0,6 m aivan Ratakujan pysäköintitalon koillispuolella. Pohjavedenpinnan lasku olisi 0,3 m vielä ainakin 150 m etäisyydellä pohjoiseen Ratakujan pysäköintitalosta. Asemakeskus Dixin koillispuolella pohjavedenpinta laskisi noin 0,4 m verrattuna ennen

rakentamista olleeseen pohjavedenpinnan tasoon. 0,3 m alenema ulottuisi suunnilleen 300 m etäisyydelle pohjoiseen asemakeskus Dixistä.

Täyttökerroksen toimivuuteen vaikuttaa oleellisesti materiaalin vedenläpäisevyyskerroin. Tässä työssä täyttökerrokselle käytetty vedenläpäisevyyskerroin vastasi keskikarkean soran vedenläpäisevyyttä. Pienemmällä vedenläpäisevyyskertoimella tai ohuemmalla täyttökerroksen paksuudella täytön pitkäaikainen vaikutus olisi ollut pienempi.

Pohjavesimallin muodostamisen ja kalibroinnin yhteydessä mallille suoritettiin herkkyystarkastelu. Herkkyystarkastelun perusteella mallinnusalueen pohjaveden virtaukseen vaikuttaa merkittävimmin hyvin vettä johtavan hiekka- ja sorakerroksen vedenläpäisevyys. Herkkyystarkastelussa hiekka- ja sorakerroksen alla olevan pohjamoreenin vedenläpäisevyyskertoimen poikkeutuksella ei ollut suurta vaikutusta mallin toimintaan. Moreenikerroksen vähäinen vaikutus pohjaveden virtaukseen voi johtua siitä, että herkkyystarkastelussa moreenikerrokselle käytetty vedenläpäisevyyskerroin oli suurimmillaankin pienempi kuin hiekka- ja sorakerroksen vedenläpäisevyyskerroin. Ruhjeisen kallion pintaosan vedenläpäisevyyskertoimen poikkeutuksella ei ollut näkyvää vaikutusta mallilla simuloituun pohjavedenpintaan.

Vaikka herkkyystarkasteluissa kallion ja moreenikerroksen vedenläpäisevyydet eivät aiheuttaneet merkittävää muutosta mallin toimintaan, nousivat ne varsinaisissa ennusteajoissa tärkeiksi tekijöiksi. Uudet maanalaiset tilat sijoittuvat kalliokynnyksen alueelle, jossa kallionpinta on paikoin korkeammalla kuin pohjavedenpinta. Kalliokynnyksen kohdalle sijoittuvien uusien maanalaisten tilojen aiheuttama vettä padottava vaikutus riippuu siitä, pääseekö pohjavesi virtaamaan kallion ruhjeissa kalliokynnyksen läpi sekä siitä, kuinka hyvin kallion päällä oleva pohjamoreeni läpäisee vettä.

Mikäli kalliokynnyksen kohdalla pohjavettä virtaa myös kallion ruhjeissa, pääsee pohjavesi virtaamaan Tikkuparkin ja asemakeskus Dixin väliin jäävän alueen läpi. Tällöin pohjavedenpinta alenee eniten Tikkuparkin lounaispuolella, ja pohjavedenpinta nousee huomattavimmin Ratakujan parkkitalon koillispuolella. Jos kallion läpi ei tapahdu pohjavedenvirtausta, muodostaisivat uudet maanalaiset tilat ja kallio yhdessä pohjavettä padottavan esteen.

Kallion ruhjeiden kautta pohjavesi voi kulkeutua pitkiäkin matkoja, jos ruhjeet ovat yhteydessä toisiinsa ja maaperän hyvin vettä johtaviin kerroksiin. Muun muassa Tikkuparkin rakentamisen yhteydessä on havaittu, että kaivantoon on tullut vettä suoraan kallioseinästä. Kallion ruhjeisuudesta Tikkurilassa on kuitenkin vähän tietoa, mistä johtuen ruhjeisuuden vaikutusta pohjavesivirtaukseen oli vaikea huomioda mallinnuksessa.

Muodostetulla mallilla määritetyt rakennusten ja täyttökerroksen vaikutukset kuvaavat pitkän ajan kuluessa tapahtuvia muutoksia eli lopputilannetta, kun pohjavesi on päässyt tasapainotilanteeseen. Työssä ei tarkasteltu muutoksiin kuluva aikaa.

Tikkurilan alue oli hankala mallinnuskohde jo sen takia, että lähes koko mallinnettava alue on rakennettua aluetta. Työssä ei mallinnettu alueelle jo sijoittuvia rakennuksia ja rakenteita, koska erilaisia rakenteita oli paljon ja monet maanalaiset rakenteet olivat pienipiirteisiä mallinnusalueen kokoon nähden. Tutkimusalueella pohjavedenpinta on ollut jatkuvassa muutoksessa ja pohjavedenpintaan on vaikuttanut luonnollisten olosuhteiden ja uusien maanalaisten tilojen lisäksi ainakin rakennustyöt, pintojen päällystäminen, hulevesien kerääminen vesijohtoverkostoon ja ohjaaminen pois alueelta, rakennusten kuivatukseen liittyvä pumppaus sekä karkean pintamaan ja täyttökerrosten kautta mahdollisesti tapahtuva pohjaveden imeytyminen.

Mallilla saadut tulokset riippuvat maakerroksille määritetyistä vedenläpäisevyyškertoimista. Maakerroksen vedenläpäisevyyden arvioiminen on kuitenkin vaikeaa jo sen takia, että maakerrosten ominaisuudet vaihtelevat suuresti niin pysty- kuin vaakasuunnassakin. Vedenläpäisevyyden määrittämisen ongelmat korostuvat, kun koko maakerrokselle käytetään yhtenäistä vedenläpäisevyysskerrointa. Tutkimusalueelta oli käytettävissä vähän tietoa maaperän vedenläpäisevyydestä ja työssä maakerrosten vedenläpäisevyys arvioitiin kohteesta otettujen maanäytteiden perusteella.

Uusien maanalaisten tilojen rakentaminen on aloitettu vuonna 2011 Tikkuparkin rakentamisella. Työssä käsiteltyjen rakennusten rakennustyöt ovat aiheuttaneet huomattavaa pohjavedenpinnan alenemista Tikkurilan keskusta-alueella. Rakennusten ympärille on Asemakeskusta lukuun ottamatta rakennettu hyvin vettä johtavat ympäristäytöt sekä salaojaputkisto, jonka tehtävänä on tasata pohjavedenpintaa rakennusten eri puolilla.

Rakennustöiden päätyttyä pohjavedenpinnan tulisi palata rakennustöitä edeltäneelle tasolle. Koska hyvin vettä johtava täyttö parantaa pohjaveden virtausta kallionpintaan asti ulottuvien rakennusten ympäri, on sen rakentaminen suositeltavaa uusille rakennuksille, joiden rakenteet ulottuvat hyvin vettä johtavaan maakerrokseen.

Pohjavedenpinnan palautumista on seurattava, ja ryhdyttävä toimenpiteisiin, jos pohjavedenpinta ei palaudu riittävän nopeasti. On mahdollista, että työnaikainen pohjavedenpinnan alenema on ollut niin suurta ja pitkäaikaista, että pohjaveden alenemisesta aiheutunut kuormituslisäys rakennusten ympäristössä oleville savikerroksille on jo nyt johtanut saven painumien kasvamiseen. Rakennusten ympäristössä tulisi selvittää myös painumien muodostumisen suuruutta.

Lähdeluettelo

- Aalto, J. 1985. Veden virtaus maassa. Teoksessa: RIL 157-1. Geomekaniikka 1. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 479 s. ISBN 951-758-086-X
- Airaksinen, J. 1978. Maa- ja pohjavesihydrologia. Oulu, Pohjoinen. 248 s. ISBN 951-9099-73-5.
- Ampuja, H. & Lehtikainen, M. 1990. Kiinteistö oy Bethania, Unikkotie 5, Tikkurila. Pohjavedenpinnan seuranta. Viitek Oy.
- Arkima, O. & Niemi, O. 2007. Valkoisenlähteentien alikulkusilta, yleissuunnitelma – Suositus pysyvän pohjavedenpinnan alennustasosta ja pohjaveden alennuksen ympäristövaikutusten selvitys. SITO Oy. 8 s.
- Cedergren, H. R. 1977. Seepage, drainage, and flow nets. 2. painos. John Wiley & Sons. 534 s. ISBN 0-471-14179-8.
- Craig, R. F. 1974. Soil mechanics. 7. painos. New York. 275 s. ISBN 0-442-30011-5.
- GTK. 1997. Vantaan kartta-alueen maaperä. Espoo. [Viitattu 9.4.2013]. Saatavissa: http://geokartta.gtk.fi/pdf/2043_04.pdf
- Hakoniemi, R. & Mäki-Torkko, T. 2013. Rakentamisen pohjavesivaikutuksien selvittäminen Tikkurilan alueella pohjaveden virtausmallin avulla. Alustava raportti. Pöyry Finland Oy.
- Helenelund, K. V. 1974. Maamekaaniset perusteet. Teoksessa: RIL 95. Pohjarakennus. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 459 s. ISBN 951-758-003-7.
- Hulevesiopas. 2012. Suomen Kuntaliitto. Helsinki. 298 s. ISBN 978-952-213-896-5.
- Kairausopas IV. 1987. Pohjavedenpinnan mittaaminen. Espoo, Suomen geoteknillinen yhdistys. ISBN 951-676-337-5.

Kivimäki, A-L. 2010. Pohjavesiolosuhteiden merkitys maankäytön suunnittelussa Valkealähteen-Hakkilan alueella. Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry.

Korhonen, K.-H. 1974. Maamekaaniset perusteet. Teoksessa: RIL 95. Pohjarakennus. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 459 s. ISBN 951-758-003-7.

Korhonen, K.-H. 1985. Muodonmuutosominaisuudet. Teoksessa: RIL 157-1. Geomekaniikka 1. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 479 s. ISBN 951-758-086-X

Korkka-Niemi, K. & Salonen, V.-P. 1996. Maanalaiset vedet – pohjavesigeologian perusteet. Turku, Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskus. 181 s. Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskuksen julkaisuja A:50. ISBN 951-29-0825-5.

Lehtinen, K. 1990. Rakentamisen vaikutus pohjavesioloihin Tikkurilan suuralueella. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, geologian ja paleontologian osasto. Helsinki. 90 s.

Malk, P. & Pajunen, H. 1975. Tikkurilan keskustan asemakaavaluonnoksen testaus. Selvitys pohjavedenpinnan alentamismahdollisuuksista ja alentamisen vaikutuksista kaavaluonnosalueella. Oy Vesi-Hydro Ab.

Martio, J. 2011. Pohjavesitilanteen tarkastelu alikulkusiltapaikoilla. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 128 s + 16 s.

Mälkki, E. 1999. Pohjavesi ja pohjaveden ympäristö. Helsinki, Tammi. 304 s. ISBN 951-26-4515-7.

Palmu, H. & Ärmänen, E. 2012. Tikkurilan toimisto- ja liikekeskus. Ratatie, Vantaa. Pohjaveden hallintasuunnitelma. Geotek Oy.

Pujades, E. & López, A. & Carrera, J. & Vásquez-Suñé, E. & Jurado, A. 2012. Barrier effect of underground structures on aquifers. Engineering Geology 145–146, s. 41-49.

Rahikainen, T. & Kärki, T. 2012. Ratakujan pysäköintitalo. Pohjarakennusehdotus ja pohjavedenhallinta. Sipti Oy.

Rahikainen, T. & Vehmas H. 2011. Tikkurilan pysäköintitalo, Asematie, Vantaa. Perustamistapaselvitys ja pohjavedenhallinta. FCG Finnish Consulting Group Oy. 4 s.

Rantamäki, M. & Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 1992. Geotekniikka. Espoo, Ota-tieto. 11. uusittu painos. 295 s. ISBN 951-672-157-5.

Seppälä, M. & Tuominen, S. 2005. Pohjaveden virtauksen mallintaminen, ympäristö-opas 121. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. 62 s. ISBN 952-11-2014-2.

Spitz, K. & Moreno, J. 1996. A practical guide to groundwater and solute transport modeling. New York, John Wiley & Sons Inc. 461 s. ISBN 0-471-13687-5.

SYKE. 2010. Tiesuolauksen pohjavesivaikutusten simulointi tyypimuodostumissa 1994. [Verkkosivu, viitattu 18.11.2012]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=197253>

SYKE. 2011. Pohjavesialuekartta: Valkealähde. [Verkkosivu, viitattu 12.5.2013] Saatavissa: <http://www.environment.fi/download.asp?contentid=133086&lan=fi>

Thode, R. & Fredlund, M. 2009. SVOOffice, User's Manual. SoilVision Systems Ltd. Saskatoon, Canada. 892 s.

Thode, R. & Gitirana, G. 2012. SVFlux, Theory Manual. SoilVision Systems Ltd. Saskatoon, Canada. 110 s.

Tielaitos. 1993. Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. Tielaitoksen selvityksiä 24/1993. Helsinki. ISBN 951-47-6998-8.

Todd, D. K. 1959. Groundwater hydrology. Wiley & Sons. 336 s.

Tuisku, T. & Määttä, E. 1992a. Maanalainen pysäköintilaitos, Tikkurila. Maa- ja kallio-perätutkimukset ja rakentamisedellytykset. Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy.

Tuisku, T. & Määttä, E. 1992b. Maanalainen pysäköintilaitos, Tikkurila. Ympäristövaikutus- ja pohjaveden hallintaselvitys. Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy.

Vakkilainen, P. 1986. Maavedet. Teoksessa: Sovellettu hydrologia. Helsinki, Vesiyhdistys. 503 s. ISBN 951-95555-1-X.

Vepsäläinen, P. & Takala, J. 2004. Ohjelma SETTLE. Teoreettisia perusteita. 19 s.

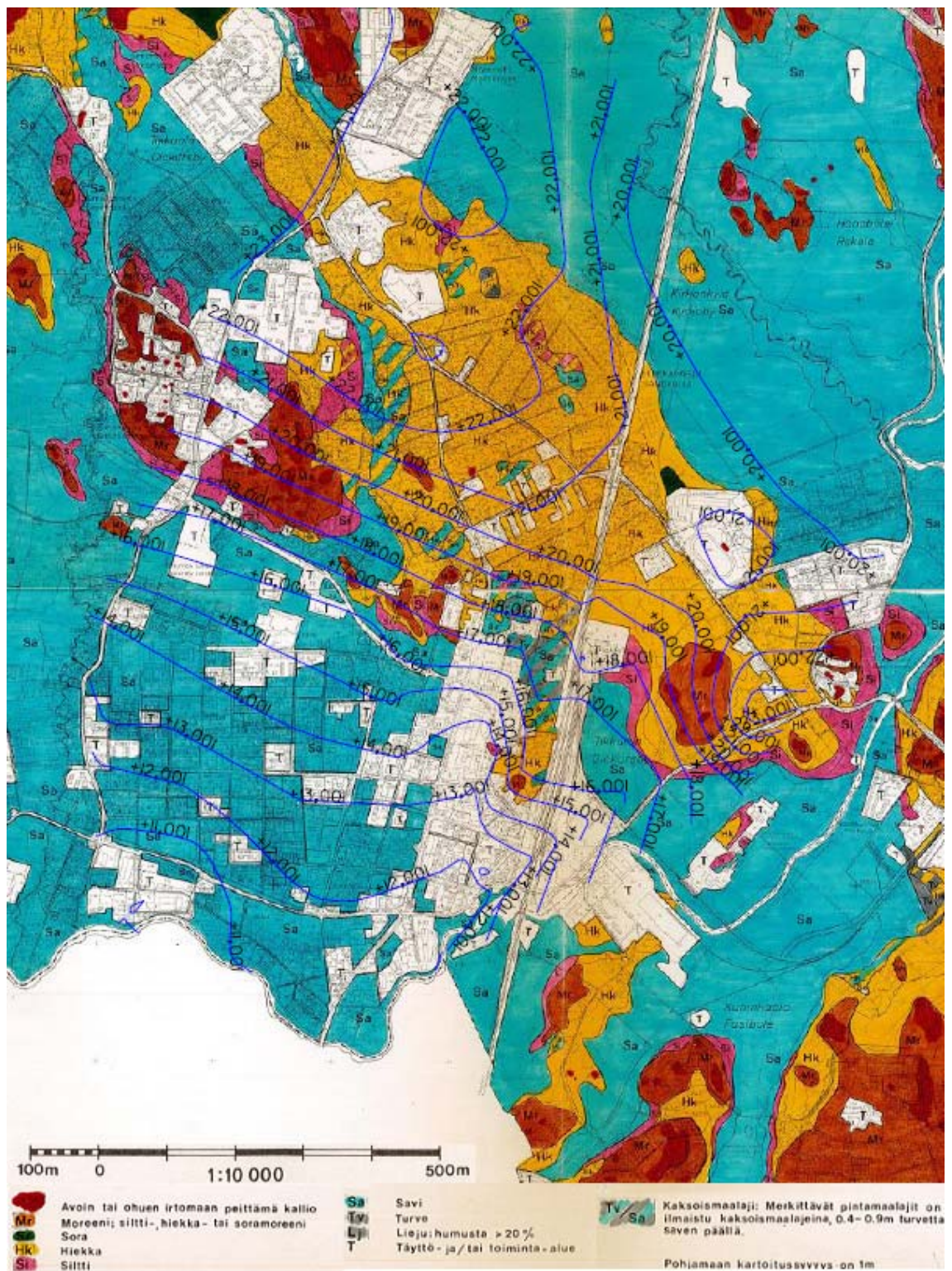
Wang, H. & Anderson, M. 1982. Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. San Francisco, Freeman. 237 s. ISBN 0-7167-1303-9.

Ympäristöministeriö. 2004. B3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, pohjarakenteet.

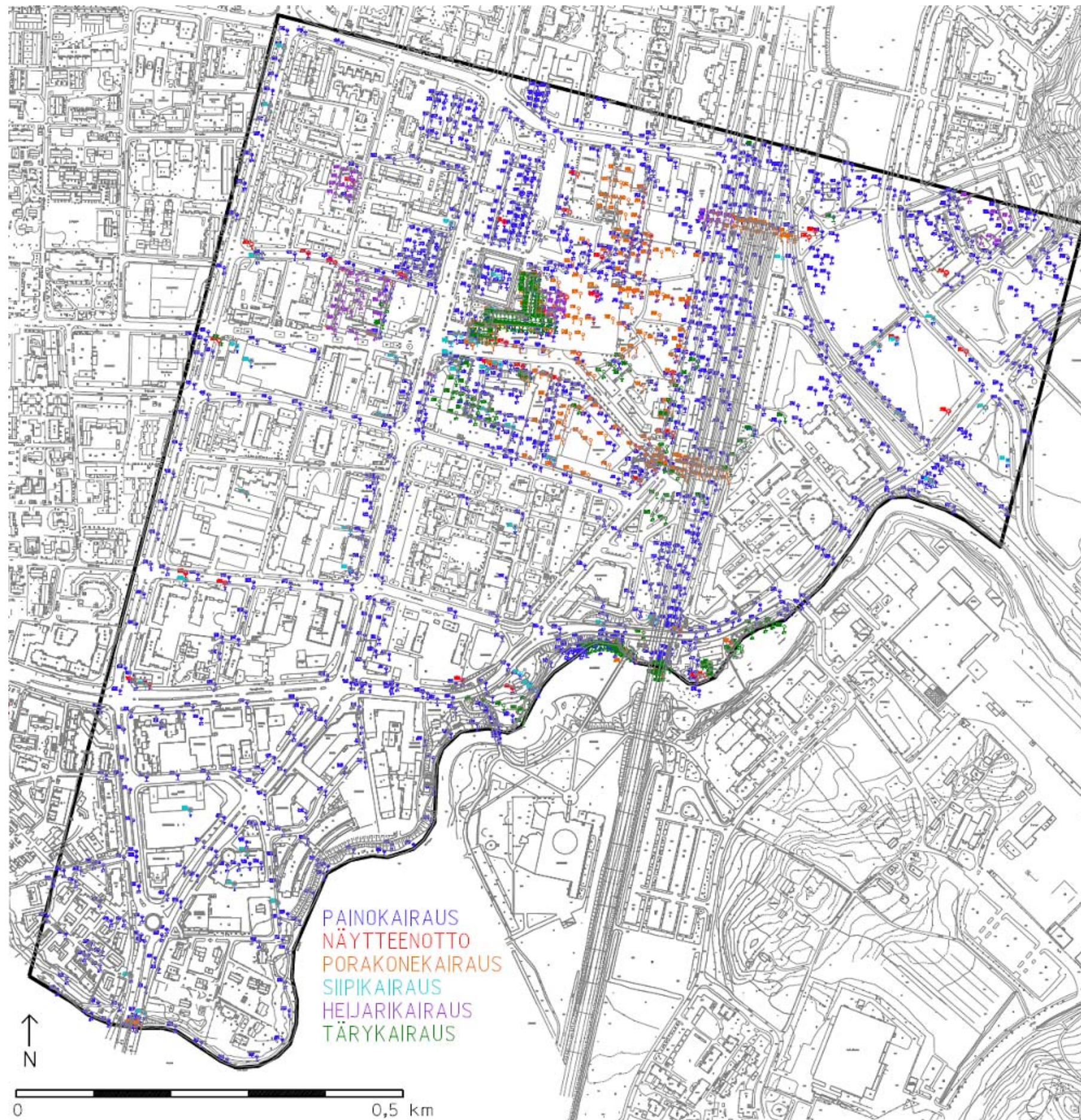
Liiteluettelo

- Liite 1. Tikkurilan ja Hiekkaharjun alueen maaperä ja pohjaveden pinnan korkeuden vuoden 2012 keskiarvo. 1 sivu.
- Liite 2. Tutkimuskohteessa suoritettut pohjatutkimukset. 1 sivu.
- Liite 3. Tehokkaan raekoon perusteella arvioitunut vedenläpäisevyyskertoimet. 2 sivua.
- Liite 4. Kalibroinnissa ja validoinnissa käytetyt aktiiviset pohjavesiputket ja pohjavesiputkista mitatut pohjavedenpinnan korkeudet ajanjaksoilla 29.10.–4.11.2009 ja 19.10.–22.11.2010. 2 sivua.
- Liite 5. Pohjavesimallin mallinnusverkko kiinteälle kalliolle tilanteessa, jossa maanalaisia tiloja ei ole vielä rakennettu. 1 sivu.
- Liite 6. Pohjavesimallin mallinnusverkko hiekka- ja sorakerrokselle, kun malliin on sijoitettu maanalaiset tilat tyhjinä alueina. 1 sivu.
- Liite 7. Painumatarkastelun kohteen sijainti. 1 sivu.
- Liite 8. Painumalaskennan tulokset. 3 sivua.

Liite 1. Tikkurilan ja Hiekkaharjun alueen maaperä ja pohjavedenpinnan korkeustason vuoden 2012 keskiarvo



Liite 2. Tutkimuskohteessa suoritettut pohjatutkimukset



Liite 3. Tehokkaan raekoon perusteella arvioidut vedenläpäisevyyskertoimet

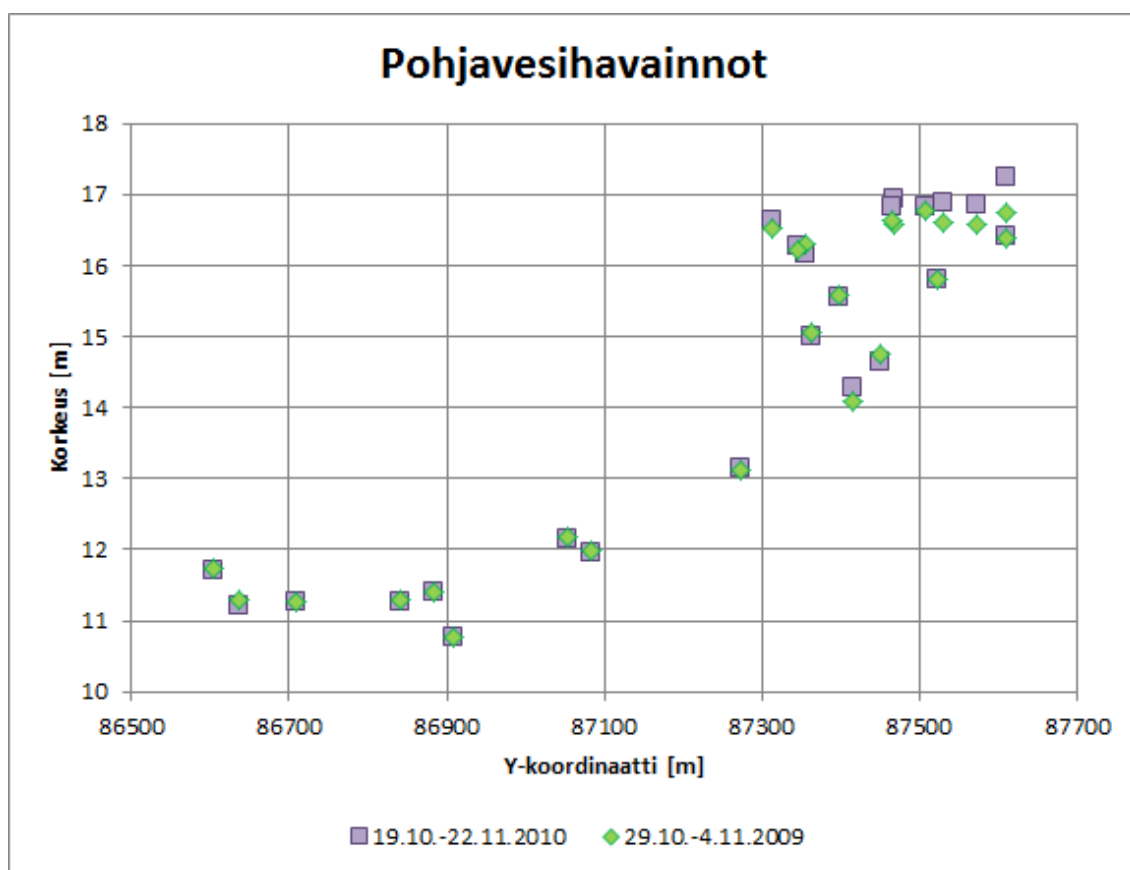
| Työnro | Piste | X | Y | Z | Maalaji | D ₁₀ | k |
|--------|-------|----------|----------|---------|-----------|-----------------|----------|
| 7609 | 12 | 87423.4 | 57831.6 | +18.3 | siHk | 0.010818 | 6.18E-07 |
| 7609 | 12 | | | +17.3 | siHk | 0.016375 | 1.42E-06 |
| 7609 | 12 | | | +16.3 | HkMr | 0.019 | 1.91E-06 |
| 7609 | 12 | | | +14.8 | HkMr | 0.0175 | 1.62E-06 |
| 7609 | 8 | 87409.1 | 57900 | +18.38 | hkSi | 0.012833 | 8.70E-07 |
| 7609 | 8 | | | +17.38 | Hk | 0.036 | 6.84E-06 |
| 7609 | 8 | | | +16.38 | HkMr | 0.029 | 4.44E-06 |
| 7609 | 8 | | | +15.38 | HkMr | 0.01675 | 1.48E-06 |
| 7609 | 2 | 87239.26 | 57881.81 | +18.03 | srHkMr | 0.117714 | 7.32E-05 |
| 7609 | 2 | | | +17.03 | Hk | 0.028462 | 4.28E-06 |
| 7609 | 2 | | | +16.03 | HkMr | 0.013222 | 9.23E-07 |
| 7609 | 2 | | | +15.03 | HkMr | 0.017 | 1.53E-06 |
| 7609 | 5 | 87317.77 | 57881.81 | +18 | hkSi | 0.014 | 1.03E-06 |
| 7609 | 5 | | | +17 | siHk | 0.023 | 2.79E-06 |
| 7609 | 5 | | | +16 | HkMr | 0.024 | 3.04E-06 |
| 7609 | 5 | | | +15 | HkMr | 0.022 | 2.56E-06 |
| 7609 | 5 | | | +14.5 | HkMr | 0.021 | 2.33E-06 |
| 5410 | 37 | 87376.43 | 57655.25 | +17.04 | hkSr | 0.123229 | 8.02E-05 |
| 5410 | 37 | | | +16.54 | srHk | 0.178571 | 1.68E-04 |
| 5410 | 37 | | | +16.04 | hkSr | 0.405738 | 8.69E-04 |
| 5410 | 701 | | | +16.15 | siHkMr | 0.0086 | 3.91E-07 |
| 5410 | 701 | | | +15.65 | siHkMr | 0.00486 | 1.25E-07 |
| 5410 | 701 | | | +15.15 | siHkMr | 0.010155 | 5.44E-07 |
| 5410 | 701 | | | +14.65 | hkSiMr | 0.0072 | 2.74E-07 |
| 5410 | 701 | | | +14.15 | hkSi | 0.01115 | 6.56E-07 |
| 5410 | 701 | | | +13.65 | siHk | 0.01505 | 1.20E-06 |
| 5410 | 701 | | | +13.15 | HkMr | 0.027875 | 4.10E-06 |
| 5410 | 701 | | | +12.65 | HkMr | 0.01048 | 5.80E-07 |
| 5410 | 701 | | | +12.15 | HkMr | 0.018543 | 1.82E-06 |
| 5410 | 36 | | | +17.268 | srHk (Tä) | 0.063 | 2.10E-05 |
| 5410 | 36 | | | +15.768 | HkMr | 0.03175 | 5.32E-06 |
| 5410 | 36 | | | +15.268 | siHk | 0.012945 | 8.85E-07 |
| 5410 | 36 | | | +14.768 | siHk | 0.013188 | 9.18E-07 |
| 5410 | 36 | | | +13.768 | siHk | 0.022 | 2.56E-06 |
| 5410 | 36 | | | +12.768 | HkMr | 0.020367 | 2.19E-06 |
| 5410 | 36 | | | +12.268 | HkMr | 0.020367 | 2.19E-06 |
| 5410 | 36 | | | +11.768 | HkMr | 0.023 | 2.79E-06 |
| 5410 | 36 | | | +11.268 | HkMr | 0.023 | 2.79E-06 |
| 5410 | 38 | 87358.19 | 57653.71 | +16.12 | hkSr | 0.125 | 8.25E-05 |
| 5410 | 38 | | | +9.62 | srHkMr | 0.00505 | 1.35E-07 |
| 5410 | 39 | 87393.1 | 57690.4 | +17.28 | siHkMr | 0.0025 | 3.30E-08 |
| 5410 | 39 | | | +12.28 | siHkMr | 0.0031 | 5.07E-08 |
| 5410 | 39 | | | +11.28 | siHkMr | 0.0031 | 5.07E-08 |
| 8407 | 11 | 87341.5 | 57759.9 | +16.59 | Hk | 0.026625 | 3.74E-06 |

| | | | | | | | |
|-------|----|----------|----------|--------|--------|----------|----------|
| 8407 | 11 | | | +15.59 | HkMr | 0.02975 | 4.67E-06 |
| 8407 | 11 | | | +13.59 | HkMr | 0.020333 | 2.18E-06 |
| 8407 | 11 | | | +12.59 | HkMr | 0.019857 | 2.08E-06 |
| 8407 | 6 | 87371.3 | 57722.8 | +16.37 | Hk | 0.0365 | 7.03E-06 |
| 8407 | 6 | | | +14.87 | Hk | 0.032 | 5.41E-06 |
| 8407 | 1 | | | +13.63 | hkSi | 0.005188 | 1.42E-07 |
| 8407 | 1 | | | +12.98 | HkMr | 0.0022 | 2.56E-08 |
| 8407 | 1 | | | +11.98 | HkMr | 0.0114 | 6.86E-07 |
| 8407 | 13 | | | +11.25 | hkSi | 0.009629 | 4.90E-07 |
| 8407 | 13 | | | +10.25 | siHkMr | 0.009 | 4.28E-07 |
| 8407 | 13 | | | +9.25 | HkMr | 0.021 | 2.33E-06 |
| 8407 | 13 | | | +7.55 | HkMr | -0.0005 | 1.32E-09 |
| 15893 | 14 | 87523.00 | 57939.99 | +17.3 | srHkMr | 0.0395 | 8.24E-06 |
| 15893 | 14 | | | +13.8 | Hk | 0.01668 | 1.47E-06 |
| 15893 | 14 | | | +12.8 | HkMr | 0.004067 | 8.73E-08 |
| 15893 | 14 | | | +11.8 | HkMr | 0.0074 | 2.89E-07 |
| 15893 | 14 | | | +10.8 | HkMr | 0.0126 | 8.38E-07 |
| 19987 | 4 | 87398.36 | 57713.44 | +16.93 | hkSr | 0.171053 | 1.54E-04 |
| 19987 | 4 | | | +15.73 | HkMr | 0.0047 | 1.17E-07 |
| 19987 | 4 | | | +15.23 | hkSi | 0.0047 | 1.17E-07 |
| 29180 | 22 | | | +14.44 | hkSi | 0.00924 | 4.51E-07 |
| 29180 | 23 | | | +14.25 | siHk | 0.017167 | 1.56E-06 |
| 29180 | 23 | | | +13.75 | siHk | 0.020356 | 2.19E-06 |
| 29180 | 24 | 87417.0 | 57783.5 | +17.72 | siHk | 0.024895 | 3.27E-06 |
| 29180 | 24 | | | +17.22 | Hk | 0.074 | 2.89E-05 |
| 29180 | 24 | | | +16.72 | HkMr | 0.022178 | 2.60E-06 |
| 29180 | 25 | 87466.9 | 57789.8 | +17.38 | hkSi | 0.015813 | 1.32E-06 |
| 29180 | 25 | | | +16.88 | siHk | 0.02895 | 4.43E-06 |
| 29180 | 25 | | | +16.38 | Hk | 0.034462 | 6.27E-06 |
| 18295 | 3 | 57444.4 | 87460 | +15.91 | hkSr | 0.1165 | 7.17E-05 |
| 18295 | 3 | | | +15.71 | hkSr | 0.1046 | 5.78E-05 |
| 18295 | 1 | 57343.9 | 87466.7 | +16.01 | srHk | 0.058545 | 1.81E-05 |
| 18295 | 1 | | | +15.56 | Hk | 0.070268 | 2.61E-05 |
| 18295 | 4 | 87442.4 | 57535.2 | +16.46 | hkSr | 0.152778 | 1.23E-04 |
| 18295 | 4 | | | +15.86 | hkSr | 0.089828 | 4.26E-05 |
| 18295 | 4 | | | +15.66 | hkSr | 0.134259 | 9.52E-05 |
| 18295 | 4 | | | +15.46 | hkSr | 0.178571 | 1.68E-04 |
| 18295 | 4 | | | +15.26 | hkSr | 0.138554 | 1.01E-04 |
| 18295 | 2 | 57409.8 | 87472.4 | +16.14 | hkSr | 0.083107 | 3.65E-05 |
| 18295 | 2 | | | +15.94 | hkSr | 0.157609 | 1.31E-04 |
| 18295 | 2 | | | +15.74 | hkSr | 0.131849 | 9.18E-05 |
| 3381 | 10 | | | +9.34 | hkSi | 0.003 | 4.75E-08 |
| 3381 | 10 | | | +7.34 | hkSi | 0.008862 | 4.15E-07 |
| 3381 | 10 | | | +6.34 | HkMr | 0.016929 | 1.51E-06 |

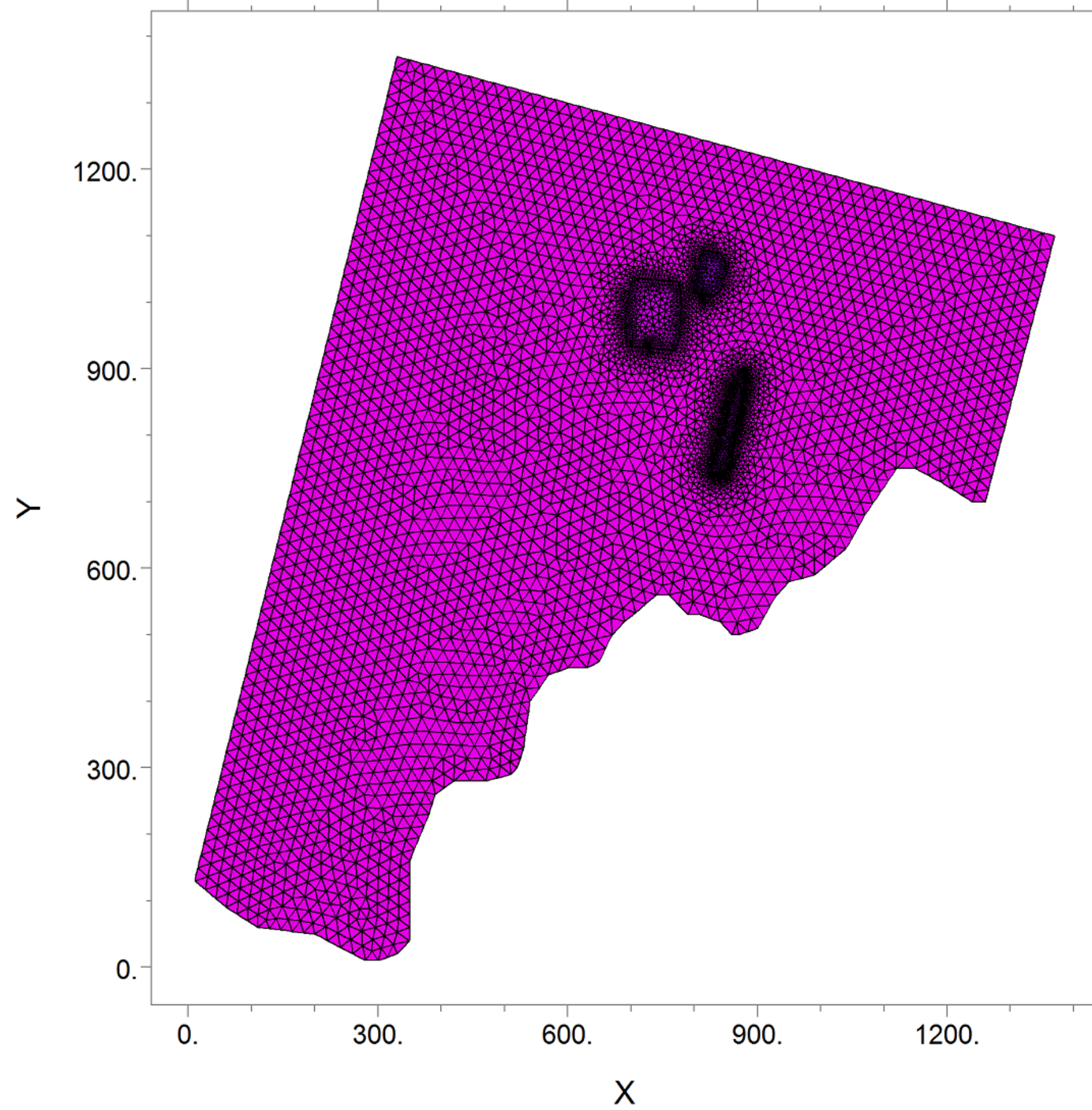
Liite 4. Kalibroinnissa ja validoinnissa käytetyt aktiiviset pohjavesiputket ja pohjavesiputkista mitatut pohjavedenpinnan korkeudet ajanjaksoilla 29.10.-4.11.2009 ja 19.10.-22.11.2010.

Pohjavedenpinnan havainnot ovat joko yksittäinen havaintojaksolla mitattu arvo tai keskiarvo useammasta mitatusta arvosta

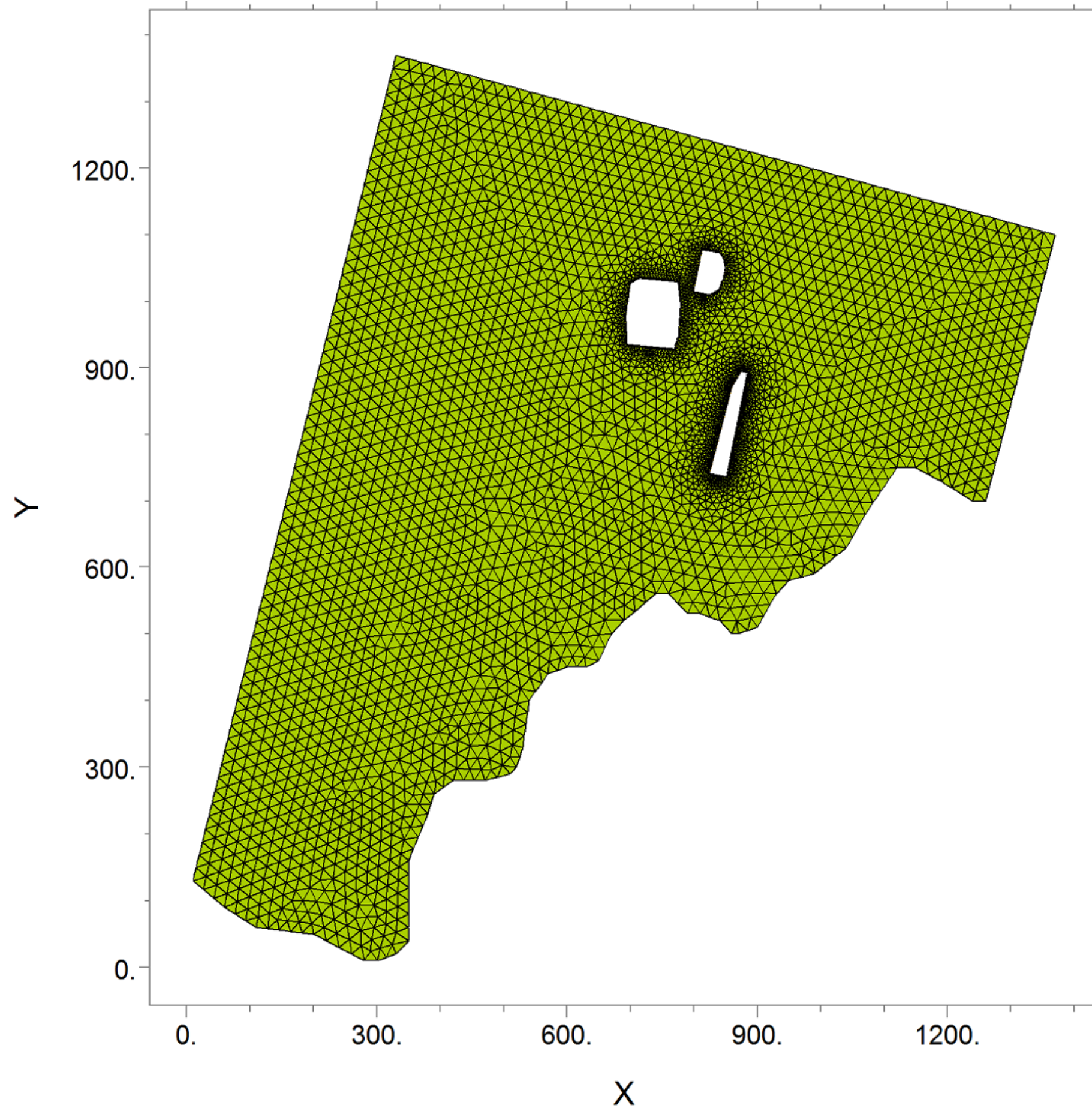
| Pohjavesi- putken tun- nus | X | Y | Maanpinnan taso | Mitattu pohjavedenpinnan taso | |
|----------------------------------|---------|---------|--------------------|-------------------------------|-------------------|
| | | | | 29.10.-4.11.2009 | 19.10.-22.11.2010 |
| 61/178P | 57712.6 | 87399.2 | + 17.70 | + 15.59 | + 15.56 |
| 61/180P | 57632.2 | 87361.9 | + 16.94 | + 15.05 | + 15.00 |
| 61/225P | 57737.9 | 87522.3 | + 17.66 | + 15.79 | + 15.80 |
| 61/241P | 57943.4 | 87530.5 | + 18.73 | + 16.61 | + 16.89 |
| 61/213P | 57848.6 | 87053.4 | + 18.08 | + 12.19 | + 12.16 |
| 61/250P | 57451.3 | 87272.8 | + 16.64 | + 13.12 | + 13.14 |
| 61/2252P | 57673.8 | 86909.5 | + 15.86 | + 10.76 | + 10.76 |
| 61/253P | 57401.2 | 86884.1 | + 16.36 | + 11.40 | + 11.39 |
| 61/254P | 57560.4 | 86841.9 | + 14.64 | + 11.28 | + 11.27 |
| 61/255P | 57517.5 | 86708.4 | + 13.71 | + 11.27 | + 11.26 |
| 61/256P | 57376.7 | 86603.1 | + 14.07 | + 11.74 | + 11.70 |
| 61/258P | 57439.6 | 87415.3 | + 15.90 | + 14.10 | + 14.28 |
| 61/259P | 57529.0 | 87450.4 | + 17.04 | + 14.74 | + 14.64 |
| 61/2229P | 57880.1 | 87314.1 | + 19.52 | + 16.52 | + 16.63 |
| 61/226P | 57943.7 | 87467.3 | + 19.35 | + 16.58 | + 16.94 |
| 61/260P | 57910.0 | 87610.0 | + 18.58 | + 16.74 | + 17.24 |
| 61/261P | 57909.5 | 87611.0 | + 18.55 | + 16.38 | + 16.40 |
| 61/2210P | 57754.5 | 87083.5 | + 18.31 | + 11.98 | + 11.96 |
| 62/170P | 58074.6 | 87465.4 | + 17.74 | + 16.62 | + 16.82 |
| 62/165P | 58298.3 | 87355.6 | + 17.99 | + 16.29 | + 16.17 |
| 62/182P | 58107.7 | 87344.4 | + 17.59 | + 16.23 | + 16.28 |
| 62/187P | 58134.4 | 87508.5 | + 17.78 | + 16.77 | + 16.83 |
| 62/2157P | 58071.7 | 87572.3 | + 18.44 | + 16.58 | + 16.86 |
| 63/334P | 57128.8 | 86635.6 | + 14.54 | + 11.28 | + 11.22 |



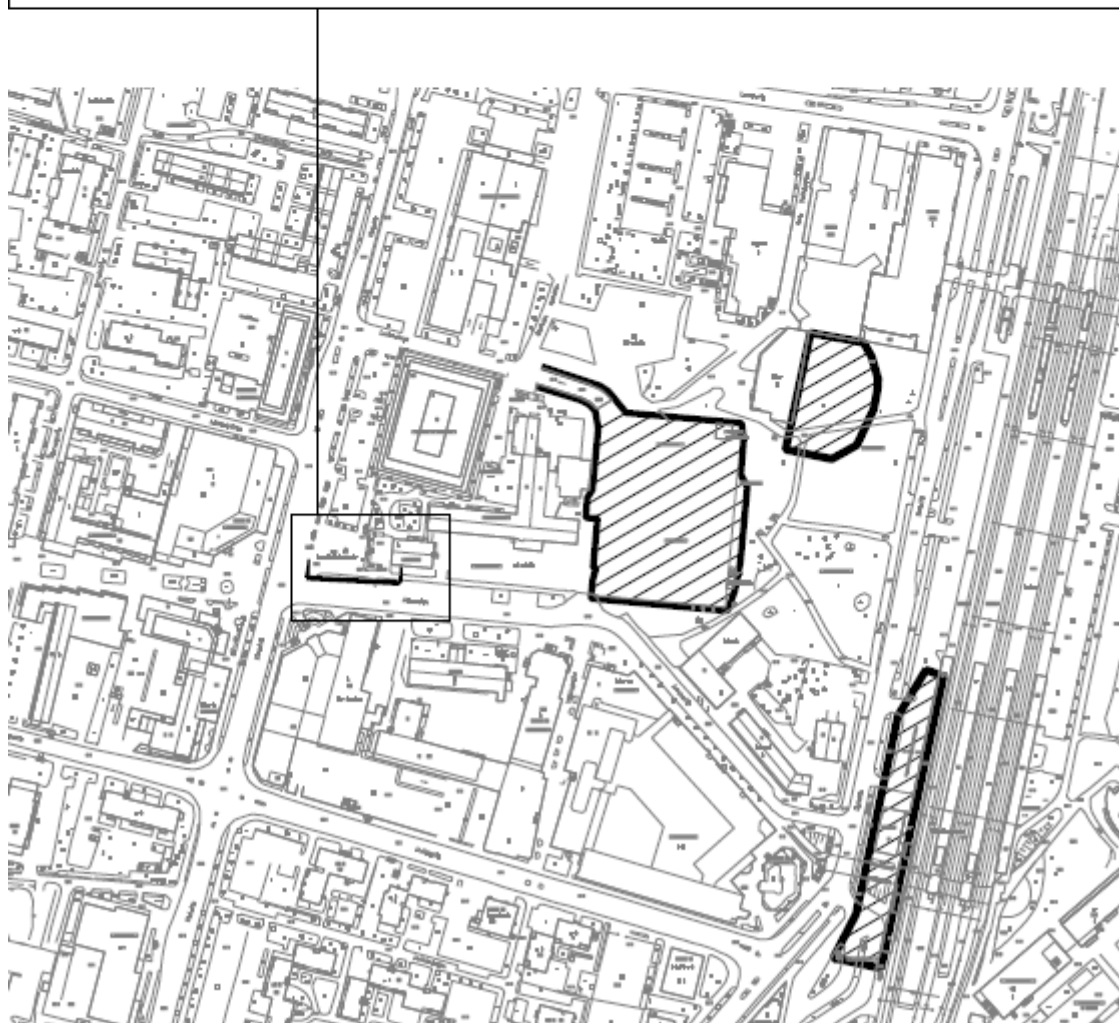
Liite 5. Pohjavesimallin mallinnusverkko kiinteälle kalliolle tilanteessa, jossa maanalaisia tiloja ei ole vielä rakennettu



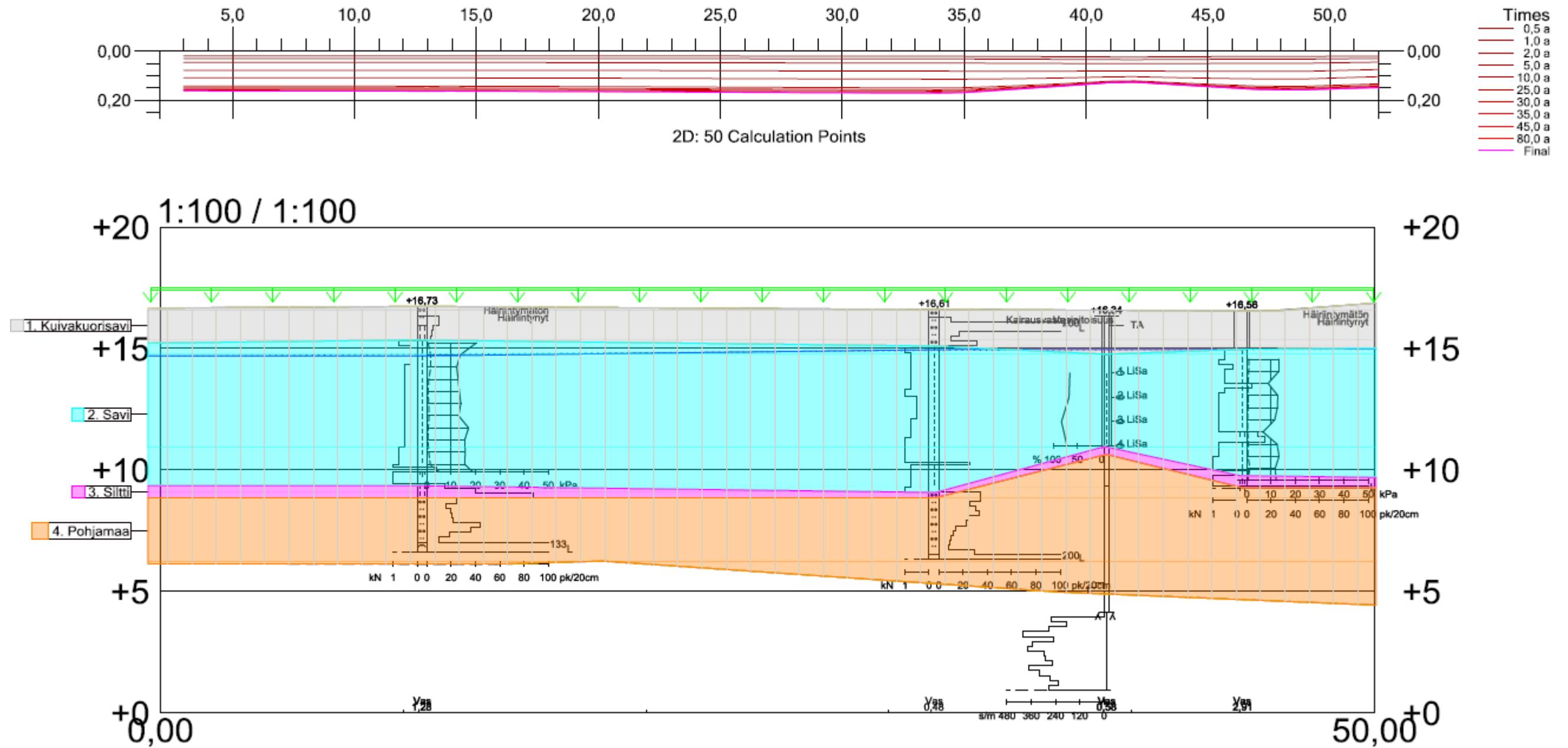
Liite 6. Pohjavesimallin mallinnusverkko hiekka- ja sorakerrokselle, kun malliin on sijoitettu maanalaiset tilat tyhjinä alueina



Liite 7. Painumatarkastelun kohteen sijainti

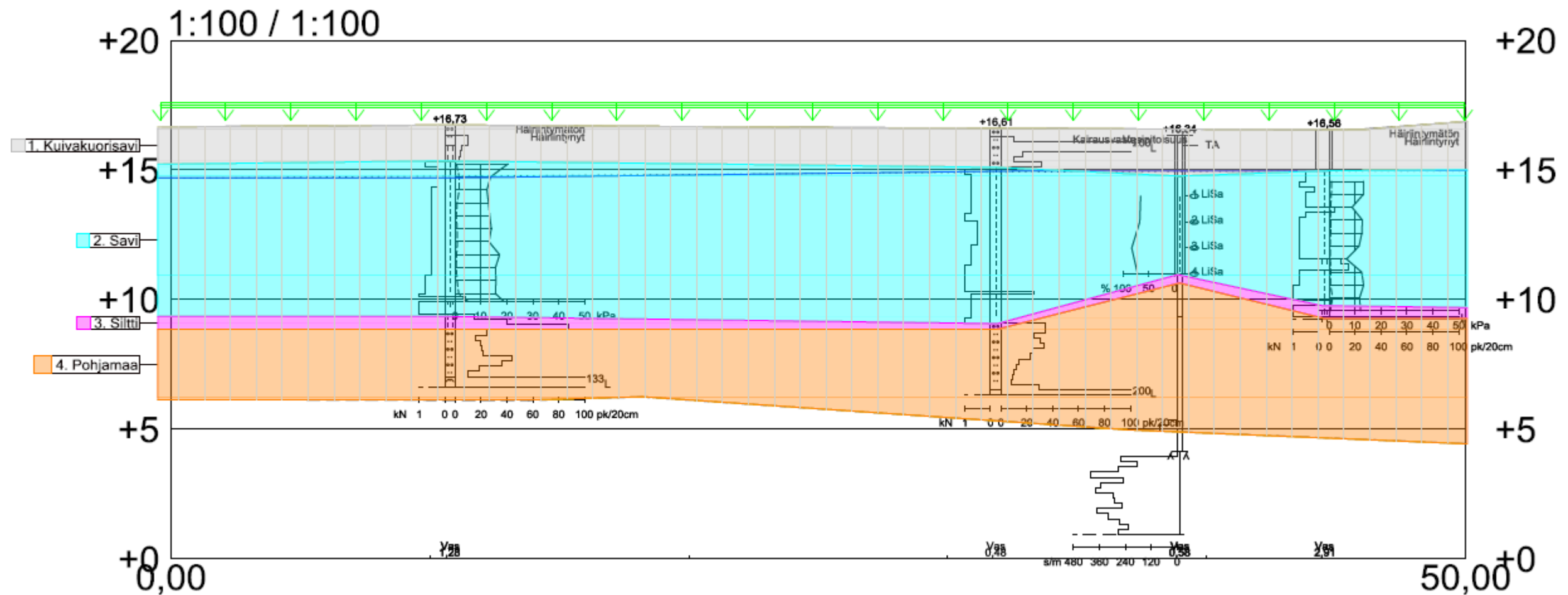
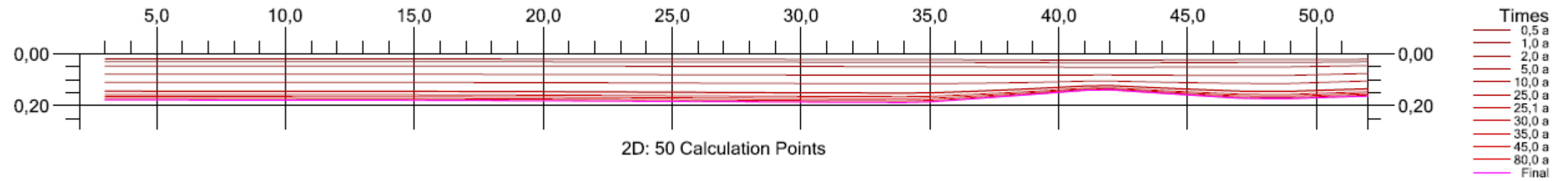


Liite 8. Painumalaskennan tulokset



/Pehmeikön painuminen
kun pohjavesi ei alene
Emma Lottanen/Vantaan kaupunki
Novapoint GeoCalc 2.3.1 (17.05.2013 13:47)

| | Soil layer | γ [kN/m ³] | γ' [kN/m ³] | Consolidation input | Cv NC [m ² /a] | Cv OC [m ² /a] | Permeable horizontally | Material model | m1 | β_1 | m2 | β_2 | $\sigma_{c\ oedo}$ [kPa] | m1 bound to σ_c | Consolidation pressure | OCR |
|---|----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|--------|-----------|--------|-----------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|------|
| 1 | Kuivakuorisavi | 17,000 | 7,000 | Constant cv | 1,00000 | 5,00000 | no | Ohde-Janbu | 50,00 | 0,50 | 100,00 | 0,50 | 55,00 | no | OCR | 1,00 |
| 2 | Savi | 15,500 | 5,500 | Constant cv | 0,50000 | 2,00000 | no | Ohde-Janbu | 7,50 | 0,10 | 15,00 | 1,00 | 55,00 | no | OCR | 1,00 |
| 3 | Siltti | 17,000 | 7,000 | Constant cv | 2,00000 | 30,00000 | no | Ohde-Janbu | 50,00 | 0,25 | 100,00 | 0,25 | 0,00 | no | NC | |
| 4 | Pohjamaa | 18,000 | 8,000 | Constant cv | 50,00000 | 100,00000 | yes | Ohde-Janbu | 100,00 | 0,50 | 200,00 | 0,50 | 0,00 | no | NC | |

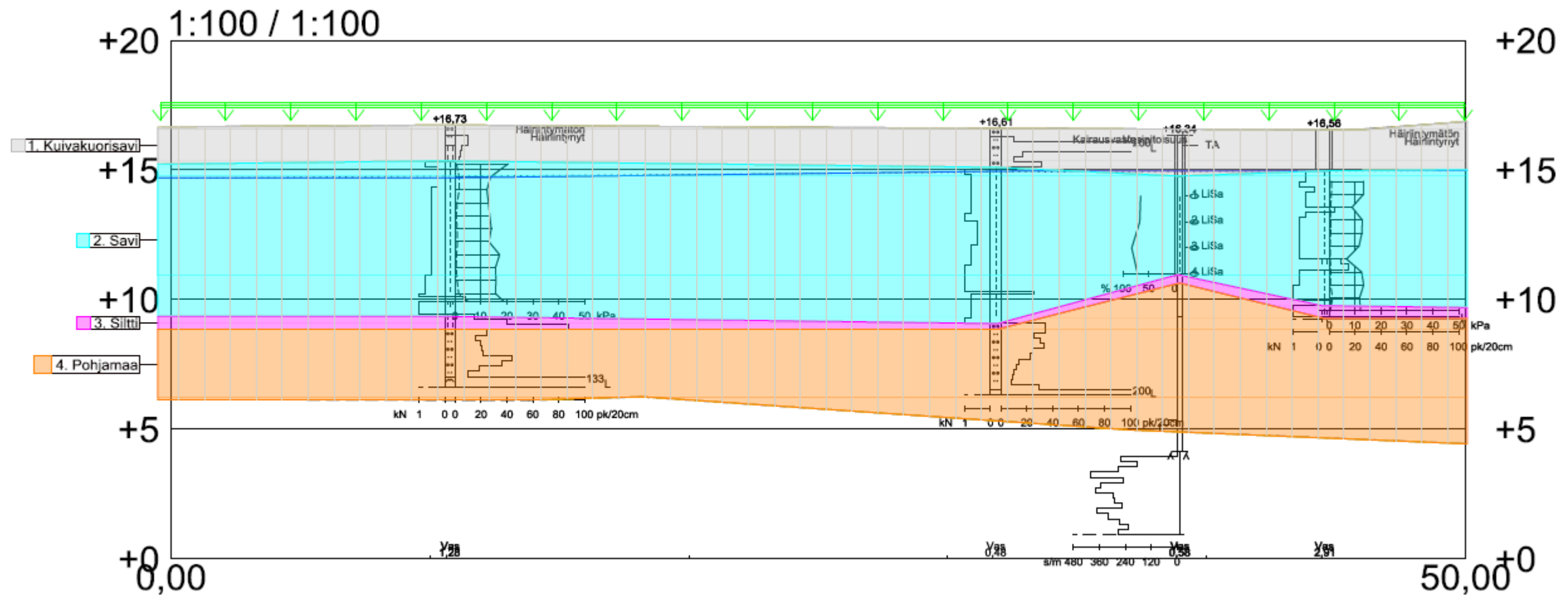
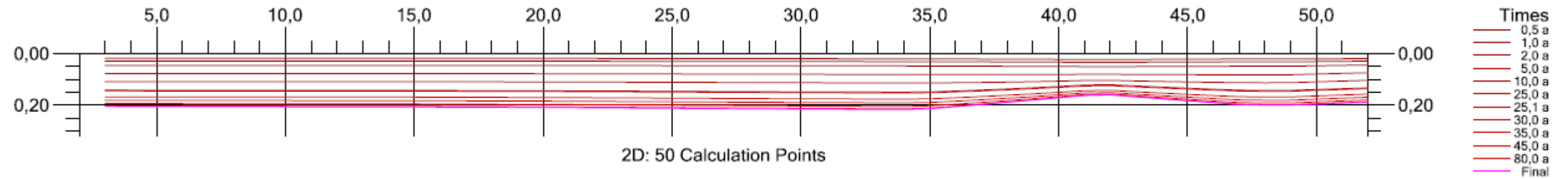


| | |
|--|--|
| /0,1 m pohjaveden alenemisen vaikutus pehmeikön painumiin | |
|--|--|

Emma Lottanen/Vantaan kaupunki

Novaspot GeoCalc 2.3.1 (17.05.2013 13:52)

| | Soil layer | γ [kN/m ³] | γ' [kN/m ³] | Consolidation input | Cv NC [m ² /a] | Cv OC [m ² /a] | Permeable horizontally | Material model | m1 | β 1 | m2 | β 2 | σ c oedo [kPa] | m1 bound to σ c | Consolidation pressure | OCR |
|---|----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|--------|-----------|--------|-----------|--------------------------|------------------------|---------------------------|------|
| 1 | Kuivakuorisavi | 17,000 | 7,000 | Constant cv | 1,00000 | 5,00000 | no | Ohde-Janbu | 50,00 | 0,50 | 100,00 | 0,50 | 55,00 | no | OCR | 1,00 |
| 2 | Savi | 15,500 | 5,500 | Constant cv | 0,50000 | 2,00000 | no | Ohde-Janbu | 7,50 | 0,10 | 15,00 | 1,00 | 55,00 | no | OCR | 1,00 |
| 3 | Siltti | 17,000 | 7,000 | Constant cv | 2,00000 | 30,00000 | no | Ohde-Janbu | 50,00 | 0,25 | 100,00 | 0,25 | 0,00 | no | NC | |
| 4 | Pohjamaa | 18,000 | 8,000 | Constant cv | 50,00000 | 100,00000 | yes | Ohde-Janbu | 100,00 | 0,50 | 200,00 | 0,50 | 0,00 | no | NC | |



/0,3 m pohjaveden alenemisen vaikutus
pehmeikön painumiin

Emma Lottanen/Vantaan kaupunki

Novspoint GeoCalc 2.3.1 (17.05.2013 13:54)

| | Soil layer | γ [kN/m ³] | γ' [kN/m ³] | Consolidation input | Cv NC [m ² /a] | Cv OC [m ² /a] | Permeable horizontally | Material model | m1 | β 1 | m2 | β 2 | σ c oedo [kPa] | m1 bound to σ c | Consolidation pressure | OCR |
|---|----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|--------|-----------|--------|-----------|--------------------------|------------------------|---------------------------|------|
| 1 | Kuivakuorisavi | 17,000 | 7,000 | Constant cv | 1,00000 | 5,00000 | no | Ohde-Janbu | 50,00 | 0,50 | 100,00 | 0,50 | 55,00 | no | OCR | 1,00 |
| 2 | Savi | 15,500 | 5,500 | Constant cv | 0,50000 | 2,00000 | no | Ohde-Janbu | 7,50 | 0,10 | 15,00 | 1,00 | 55,00 | no | OCR | 1,00 |
| 3 | Silti | 17,000 | 7,000 | Constant cv | 2,00000 | 30,00000 | no | Ohde-Janbu | 50,00 | 0,25 | 100,00 | 0,25 | 0,00 | no | NC | |
| 4 | Pohjamaa | 18,000 | 8,000 | Constant cv | 50,00000 | 100,00000 | yes | Ohde-Janbu | 100,00 | 0,50 | 200,00 | 0,50 | 0,00 | no | NC | |